

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Gašper Ferdin

**Avtomatizacija ogrevalnega sistema s
toplotno črpalko**

DIPLOMSKO DELO

VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJSKI PROGRAM PRVE
STOPNJE RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKA

MENTOR: izr. prof. dr. Uroš Lotrič

Ljubljana, 2016

Fakulteta za računalništvo in informatiko izdaja naslednjo nalogo:

Tematika naloge:

Ob nakupu ogrevalnih naprav običajno dobimo tudi elemente, potrebne za njihovo avtomatsko vodenje. Ti elementi so pogosto omejeni na posamezno ogrevalno napravo. Razširitev ogrevalnega sistema z dodatnimi ogrevalnimi napravami zato lahko povzroči kup nevšečnosti, ki se odražajo v neoptimalnem procesu ogrevanja. V nalogi poiščite rešitev in izdelajte prototip za izboljšanje procesa ogrevanja v testnem ogrevalnem sistemu, ki vključuje ogrevalno napravo na olje s sončnimi kolektorji in toplotno črpalko. Rešitev naj bo kar se da avtomatizirana in naj omogoča enostavno upravljanje s sistemom.

Zahvaljujem se celotni družini za vso podporo v času študija in pri izdelavi diplomske naloge. Zahvaljujem se Marku Šifrarju, ki je finančno podprl celotni projekt, pomagal pa je tudi pri načrtovanju celotnega sistema. Prav tako se za pomoč zahvaljujem mentorju prof. dr. Urošu Lotriču.

Mojemu oĉetu.

Kazalo

Povzetek

Abstract

1	Uvod	1
2	Analiza obstoječega stanja	3
3	Strojna oprema	9
3.1	Krmilnik	9
3.2	Vhodno izhodni moduli	10
3.3	Elektro omara	12
4	Razvoj programske opreme	17
4.1	Krmiljenje obtočnih črpalk	18
4.2	Krmiljenje naprav za ogrevanje	22
4.3	Protokol Modbus	27
4.4	Vizualizacija	29
5	Sklepne ugotovitve	39
	Literature	41
	Priloge	45
A	Vezalni načrt elektro omare	47

Povzetek

Naslov: Avtomatizacija ogrevalnega sistema s toplotno črpalko

Ogrevalne sisteme zaradi gibanja cen nadgrajujemo z novejšimi, bolj varčnimi ogrevalnimi napravami. Mnogokrat ima zato vsaka ogrevalna naprava svojo regulacijo, ki deluje neodvisno od ostalih. Z relativno nizko investicijo v avtomatizacijo lahko te naprave spravimo v celoto in s tem povečamo učinkovitost ogrevalnega sistema. Na primeru smo pokazali, kako se da povezati kotel na kurilno olje, sanitarno toplotno črpalko, sončne kolektorje in toplotno črpalko v enovit sistem. Da bi povečali učinkovitost ogrevalnega sistema, je bilo potrebno preučiti katera naprava je najbolj učinkovita za dane zunanje pogoje. Najbolj pomembno je učinkovito delovanje toplotne črpalke. Če pogoji za delovanje toplotne črpalke niso ustrezni, se ogrevanje preklopi na drugo, bolj ustrezno, ogrevalno napravo. Delovanje in upravljanje celotnega sistema lahko spremljamo v spletni vizualizaciji, do katere lahko dostopamo tudi preko globalnega spleta. Zaradi avtomatizacije ogrevalnega sistema pričakujemo, da se bodo stroški letnega ogrevanja zmanjšali za približno 20 %.

Ključne besede: avtomatizacija, ogrevanje, toplotna črpalka.

Abstract

Title: Automation of heating system with heat pump

Because of high prices of energy, we are upgrading our heating systems with newer, more fuel efficient heating devices. Each new device has its own control system, which operates independently from other devices in a heating system. With a relatively low investment costs in automation, we can group devices in one central control system and increase the energy efficiency of a heating system. In this project, we show how to connect an oil furnace, a sanitary heat pump, solar panels and a heat pump in to a single control system. To improve energy efficiency, the heating system must choose the most efficient device, depending on the external conditions. The main device in the heating system is the heat pump. It operates efficiently in relevant external conditions. If the external conditions do not match required criteria, another more efficient heating device is used. For management of entire heating system we have prepared an online visualization system, that can be accessed via global internet. We expect that improved heating automation will reduced heating costs by 20%.

Keywords: automation, heating, heat pump.

Poglavje 1

Uvod

Zaradi visokih cen energentov v zadnjem obdobju, smo naprave v ogrevalnih sistemih posodobili ali nadomestili z novimi, bolj učinkovitimi. Vsaka ogrevalna naprava ima svoje prednosti in slabosti. Nekatere naprave lahko sistem ogreje hitreje kot druge, ampak zato porabijo večjo količino energije. Učinkovito delovanje nekaterih naprav je odvisno tudi od zunanjih pogojev. Paziti je potrebno, da pri neustreznih pogojih te naprave čim manj obratujejo, saj s tem znižujejo učinkovito delovanje celotnega ogrevalnega sistema. Zaradi tega se je panoga avtomatizacije ogrevalnega sistema v zadnjem času zelo razvila. Iz članka [1] lahko razberemo, da z ustrezno avtomatizacijo ogrevalnega sistema zmanjšamo stroške ogrevanja za 5 - 20 %. Glavni namen je združiti vse naprave v celoto, da lahko med njimi enostavno preklapljammo glede na izkoristke naprav. Za izvedbo avtomatizacije je potrebno v sistem dodati krmilno enoto, ki na podlagi vhodnih podatkov in nekaterih nastavljenih parametrov izračuna izhodne vrednosti delovanja naprav v sistemu. Avtomatizacija stremi k temu, da za trenutne pogoje izbere ogrevalno napravo z največjim izkoristkom, prostore pa ogrevamo takrat, ko je to potrebno. To lahko dosežemo z nastavljenimi urniki ogrevanja.

Večina proizvajalcev ogrevalnih naprav, na primer toplotnih črpalk, kotelov, peči, ima razvite lastne avtomatizacijske sisteme za njihove naprave. Ker so naprave v okviru te diplomske naloge starejše ali celo domače izde-

lave, noben že razvit sistem ne bi deloval pravilno. V okviru diplomske naloge bomo izvedli avtomatizacijo ogrevalnega sistema s krmilnikom Beckhoff CX8080. Za realizacijo avtomatizacije bo potrebno namestiti nekaj novih temperaturnih tipal, na podlagi katerih bo program krmilnika vklapljal in izklapljal obtočne črpalke ogrevalnih vej in izvajal preklope med ogrevalnimi napravami. Glavni ogrevalni napravi v sistemu sta toplotna črpalka zrak-voda in kotel na kurilno olje. Toplotna črpalka je najbolj učinkovita ogrevalna naprava v sistemu, zato bo izbrana kot primarna naprava ogrevanja. Preklop med napravama se bo zgodil takrat, ko pogoji za delovanje toplotne črpalke niso dovolj dobri ali ko bo na toplotni črpalki prišlo do napake. Pri ogrevanju celotnega objekta bo potrebno zagotavljati željene temperature v posameznih prostorih, ki jih ogrevajo različne ogrevalne veje. Ogrevanje prostorov bo s pomočjo urnikov potrebno prilagoditi svojim potrebam.

V naslednjem poglavju je opisano obstoječe stanje obravnavanega objekta. Na kratko so opisane naprave, ki so prisotne v ogrevalnem sistemu, njihova dosedanja regulacija in težave, ki se pojavljajo pri njej. Strojna oprema, ki smo jo uporabili pri diplomski nalogi, je predstavljena v tretjem poglavju. Opisani so uporabljeni vhodno izhodni moduli, krmilnik CX8080, temperaturna tipala Pt-100 in izdelana elektro omara. Poglavje 4 opisuje razvoj programske opreme in spletne vizualizacije. Sklepne ugotovitve so predstavljene v poglavju 5, predstavljene pa so tudi ideje za nadaljno izboljšanje energetske učinkovitosti ogrevalnega sistema.

Poglavje 2

Analiza obstoječega stanja

Ogrevalni sistem se je skozi leta spreminjal in nadgrajeval, zaradi cen energentov. Najprej se je za ogrevanje uporabljal kotel na trda goriva. Pri tem ni bilo velike možnosti uravnavanja temperature v samem ogrevalnem sistemu, stopnja udobja je bila nizka, saj je bilo potrebno v kotel na vsakih nekaj ur ponovno naložiti drva, da plamen ni ugasnil. Nato se je zaradi nizke cene kurilnega olja v ogrevalni sistem dodal kotel na kurilno olje. Sam kotel ima že svoj termostat, s katerim je možno nastaviti željeno temperaturo v ogrevalnem sistemu. Pri tej ogrevalni napravi je bilo potrebno postaviti cisterno za kurilno olje. Na začetku polnjenje cisterne ni predstavljalo velikega stroška, v letu 2009 pa je cena kurilnega olja narasla na dvakratnik cene iz leta 2007. Zaradi te podražitve se je kotel na trda goriva nadomestil s toplotno črpalko. V sistemu sta torej kotel na kurilno olje in toplotna črpalka.

Toplotna črpalka je primarna naprava za ogrevanje vode v ogrevalnem sistemu. Toplotna črpalka je tipa zrak-voda. To pomeni, da kot vir toplote uporablja okoliški zrak, ki gre skozi zračni izmenjevalec. Hladivo tako prejme okoliško toploto, ki jo kompresor dvigne na višji temperaturni nivo in jo odda preko vodnega izmenjevalca v ogrevalni sistem. Najvišja temperatura ogrevalne vode, ki jo lahko doseže toplotna črpalka, je 60 °C. Grelna moč toplotne črpalke je približno 12 kW, poraba električne moči pa okrog 5 kW. To pomeni da je grelna število (angl. Coefficient Of Performance) toplotne

črpalke:

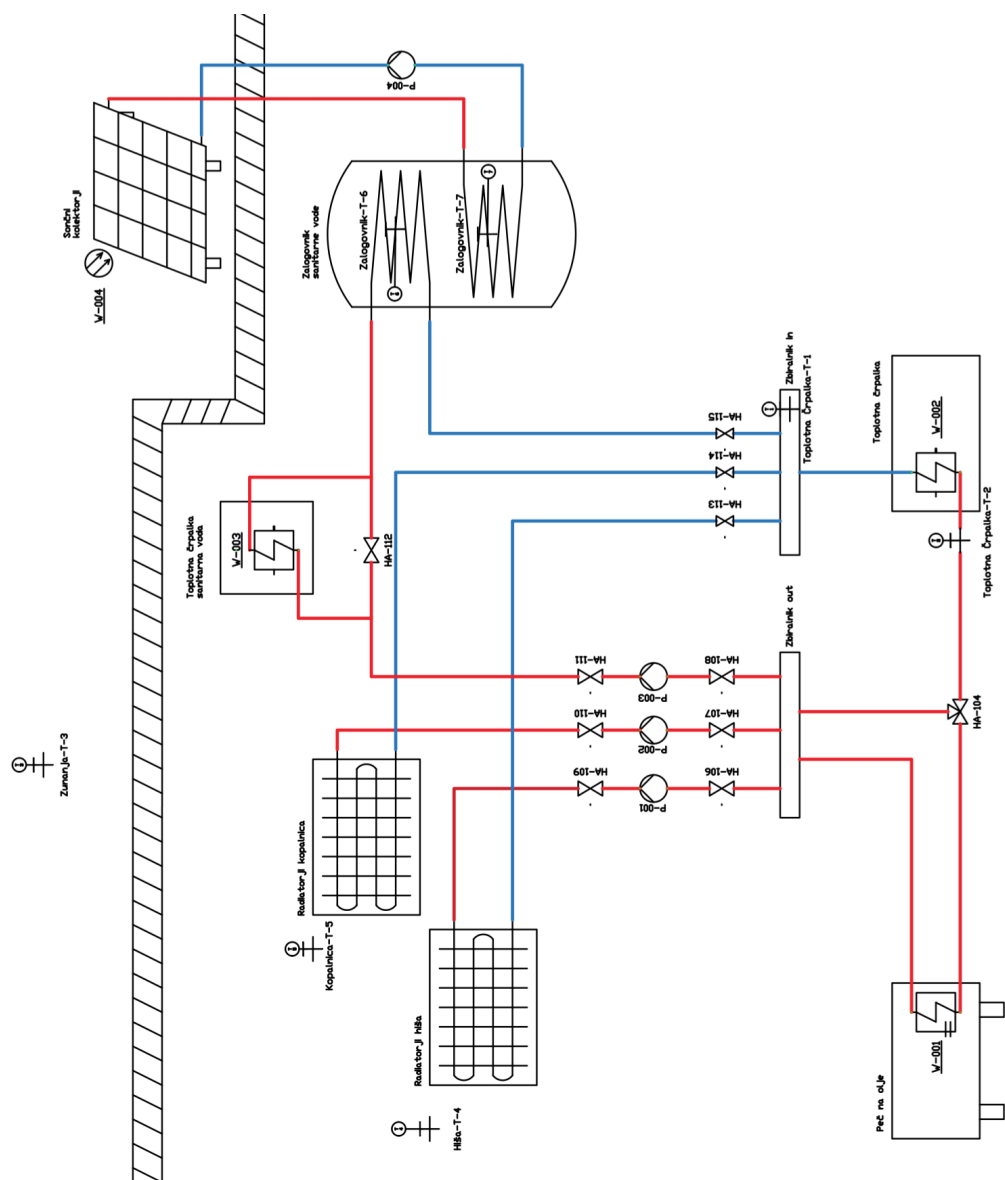
$$COP = \frac{Q}{W} = \frac{12 \text{ kWh}}{5 \text{ kWh}} = 2,40 \quad ,$$

kjer je Q proizvedena grelna energija, W pa dovedena električna energija [2]. Na ogrevalno sezono se porabi okrog 10,6 MWh, to pa je s stroškovnega vidika okrog 1400 EUR. Izkoristek toplotne črpalke močno pade, če pade temperatura zunanjega zraka pod -5°C , zato se v tem primeru za ogrevanje uporabi kotel na kurilno olje.

Kotel na kurilno olje lahko dela tudi pri nižjih zunanjih temperaturah, vodo v ogrevalnem sistemu pa lahko ogreje tudi do 80°C . Nima nobenega rezervoarja za toplo vodo, zato direktno ogreva vodo v ogrevalnem sistemu. Nazivna ogrevalna moč kotla je 16,5 kW [3]. Ko v ogrevalnem sistemu še ni bilo toplotne črpalke in se je za ogrevanje uporabljal samo kotel, se je na ogrevalno sezono porabilo približno 3500 l kurilnega olja, stroškovno gledano okrog 3200 EUR.

Celotna ogrevalna shema je prikazana na sliki 2.1. Ogrevalni sistem v hiši je razdeljen na tri ločene grelne veje. Vsaka veja ima svojo obtočno črpalčko, ki skrbi za konstantno kroženje tople vode po ogrevalni veji. Vsaka ogrevalna veja ima svoj termostat, ki skrbi za vklop ali izklop obtočne črpalke. Prostori v hiši se ogrevajo z radiatorji. Nekatere radiatorje smo po montaži toplotne črpalke zamenjali z novejšimi nizkotemperaturnimi radiatorji, ostali pa so še starejši visokotemperaturni radiatorji. Glavna razlika med njimi je, da morajo nizkotemperaturni radiatorji imeti veliko večjo površino, če hočemo zagotavljati enak toplotni učinek, kot pri visokotemperaturnih. Visokotemperaturni potrebujejo vodo s temperaturo $70 - 80^\circ\text{C}$, ki jo zagotavljajo kotli na različna goriva na primer plin, kurilno olje, biomasa. Nizkotemperaturnim radiatorjem zadostuje temperatura vode $45 - 55^\circ\text{C}$, ki jo lahko dosežejo toplotne črpalke [4].

Prva ogrevalna veja skrbi za ogrevanje vseh bivalnih prostorov v hiši. Ta ogrevalni krog je največji. V dnevni sobi, ki je največji prostor v hiši, je postavljen termostat, na katerem lahko nastavimo urnik ogrevanja. Vse te nastavitve so zelo omejene. Termostat ne podpira nobenega komunikacij-



Slika 2.1: Strojna shema ogrevalnega sistema



Slika 2.2: Zalogovnik tople sanitarne vode, z dvema izmenjevalcema

skega protokola, zato se v prenovljenem sistemu ne bo uporabljal.

V hiši sta dve kopalnici, ki spadata pod drugo ogrevalno vejo. V eni izmed njih se uporablja brezžični termostat. Tako kot na termostatu v dnevni sobi, lahko tudi tukaj nastavimo urnik ogrevanja. Problem brezžičnega termostata je, da brezžični sprejemnik v kotlovnici večino časa ne prejme signala za vklop ali izklop od termostata v kopalnici. Zato se zna zgoditi, da kopalnica ostane hladna ali pa se preveč ogreje.

Ostala nam je še veja ogrevanja sanitarne tople vode. V kotlovnici je vgrajen zalogovnik s prostornino 300 l, z dvema toplotnima izmenjevalcema (slika 2.2). Prvi je uporabljen za ogrevanje iz sončnih kolektorjev, drugi pa za gretje iz glavnega razdelilca. Sončni kolektorji imajo svojo regulacijo, ki je sestavljena iz dveh temperaturnih tipal, dveh potenciometrov in obtočne črpalke. Prvo temperaturno tipalo je v samem zalogovniku, drugo pa je na strehi pri sončnih kolektorjih. S potenciometrom določimo, kolikšna mora biti razlika temperatur, da se vklopi obtočna črpalka samih kolektorjev [5]. Drugi izmenjevalec je priključen na glavni razdelilec ogrevalnega sistema



Slika 2.3: Glavni ogrevalni razdelilec z obtočnimi črpalkami

(slika 2.3). Ker je izmenjevalec v zalogovniku premajhen, da bi lahko ogrel celotno sanitarno vodo na 45 - 50 °C, je v sistem zaporedno vgrajena manjša sanitarna toplotna črpalka z močjo 0,8 kW. Ta skrbi za dogrevanje vode, ki pride iz glavnega razdelilca.

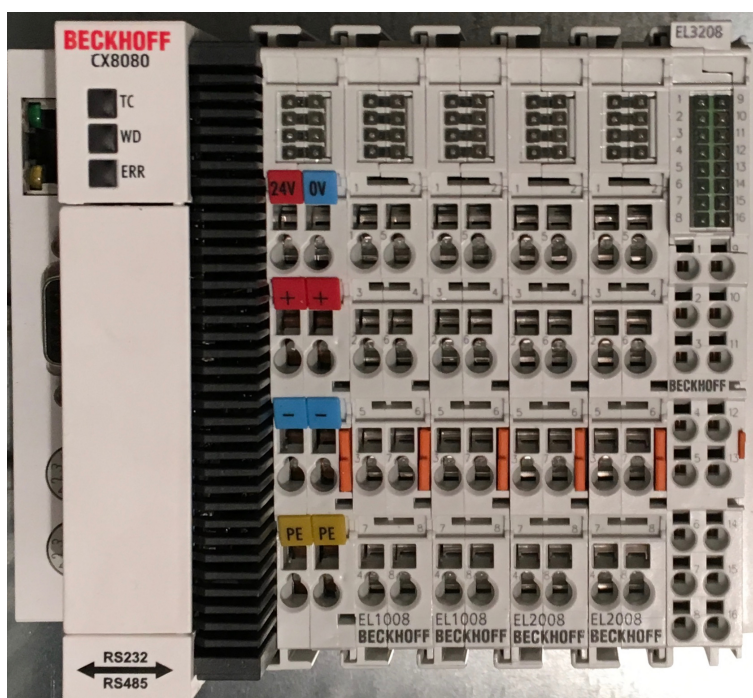
Iz zgornjega opisa obstoječega stanja je razvidno, da naprave nimajo skupne regulacije. Vsaka naprava deluje s svojo logiko, zato delovanje ni najbolj energetske učinkovito.

Poglavje 3

Strojna oprema

3.1 Krmilnik

Glavna naprava sistema je krmilnik CX8080 podjetja Beckhoff, ki ga lahko vidimo na sliki 3.1. Programirljivi krmilnik temelji na 32 bitnem procesorju ARM s frekvenco 400 MHz, s 64 MB glavnega pomnilnika. Za sekundarni pomnilnik se uporablja kartica MicroSD velikosti 512 MB. Na ohišju krmilnika je konektor DB-9 za serijsko komunikacijo. Uporablja se lahko vmesnik RS-232 ali RS-485 [6]. Celotni programski sistem temelji na operacijskem sistemu Windows CE podjetja Microsoft. Sam krmilnik nima grafičnega vmesnika, zato lahko do namizja operacijskega sistema (slika 3.2) dostopamo samo preko mrežne kartice. Za sistemsko konfiguracijo in za izvajanje programskega dela krmilnika skrbi sistem TwinCAT 2. Sistem omogoča, da je programiranje krmilnika v skladu s standardom IEC 61131-3. Standard predpisuje šest programskih jezikov za programiranje krmilnika in sicer lestvični diagram (LD), funkcijski načrt (FBD), strukturirani tekst (ST), listo ukazov (IL) in dve različici diagrama poteka (SFC, CFC). Predpisi standarda določajo tudi podatkovne tipe spremenljivk. Ob osnovnih podatkovnih tipih (bajt, nepredznačena beseda, predznačena beseda, dvojna beseda, itd.) lahko uporabnik sestavi tudi svojo strukturo. Vsa programska koda mora biti organizirana v programske enote, kakor določa standard. Glavne tri pro-

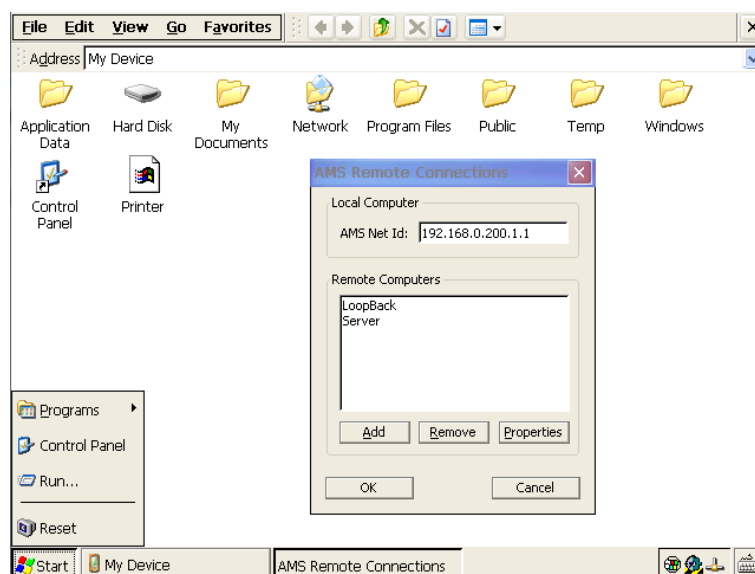


Slika 3.1: Krmilnik z vhodno izhodnimi moduli

gramske enote so funkcije (FUN), funkcijski bloki (FB) in programi (PROG). Funkcije so deli programa, ki se ponavadi pogosto ponavljajo, lastnosti pa jim določimo s klicnimi parametri. Lahko vrnejo funkcijsko vrednost, skupaj z dodatnimi izhodnimi parametri. Funkcijski bloki so nadgrajene funkcije s svojim podatkovnim blokom. To pomeni, da vsak klic funkcijskega bloka hrani svoje statične spremenljivke in je del uporabniškega programa. Funkcijski blok je najbolj pogosto izbrana programska enota. Ostali so nam samo še programi, ki služijo za izvajanje glavnega programa [7].

3.2 Vhodno izhodni moduli

Pri načrtovanju projekta smo predvideli, da bomo potrebovali 9 digitalnih vhodov, 9 digitalnih izhodov in 6 analognih vhodov za temperaturna tipala. Krmilnik, ki je opisan v prejšnjem poglavju, nima možnosti priklopa nobe-



Slika 3.2: Namizje Windows CE na krmilniku

nega vhoda ali izhoda, zato so potrebni dodatni moduli. Potrebovali smo torej dva modula za digitalne vhode EL1008, dva modula za digitalne izhode EL2008 in modul za uporovna temperaturna tipala Pt-100 EL3208.

Temperaturna tipala Pt-100 so narejena iz platine, temeljijo pa na spreminjanju upornosti platine glede na temperaturo. Pri temperaturi 0 °C imajo upornost 100 Ω , nato upornost linearno narašča skupaj s temperaturo [8]. Temperaturna tipala so v štirižilni izvedbi, modul EL3208 pa omogoča samo dvožilni priklop. Razlika med štirižilnim in dvožilnim tipalom je v natančnosti samega temperaturnega tipala. Pri dvožilnem tipalu se pri računanju temperature upošteva tudi upornost samega kabla, ki pa z dolžino močno naraste, meritev pa zato ni točna. S štirižično vezavo lahko modul kompenzira dolžino kabla, dobimo pa natančno meritev upornosti na temperaturnem tipalu. Ker modul EL3209 omogoča samo dvožilni priklop, se lahko za vsak vhod določi kalibracija temperaturnega tipala. V prostoru izmerimo temperaturo s pomočjo termometra in jo primerjamo z izmerjeno. V uporovni tabeli Pt-100 lahko preverimo, kolikšna je sprememba upornosti, če je razlika med temperaturo v prostoru in izmerjeno temperaturo 2 °C.



Slika 3.3: Namestitev Pt-100 temperaturnih tipal

Vrednost iz tabele uporabimo kot korekcijo, s tem pa povečamo natančnost meritve dvožilnega priklopa temperaturnega tipala. Na sliki 3.3 je prikazana vgradnja temperaturenega tipala Pt-100 za merjenje temperature sanitarne vode v zalogovniku.

3.3 Elektro omara

V kotlovnici je bila pred tem projektom že obstoječa elektro omara, ki je skrbela za delovanje toplotne črpalke. Obstoječa omara ni bila dovolj velika, da bi vanjo vgradili krmilnik, zato smo izdelati novo. Pri izdelavi nove elektro omare smo uporabili elektro elemente iz stare omare, dodati pa je bilo potrebno še krmilnik, nekaj štiripolnih relejev, napajalnik in nekaj vrstnih sponk. Notranjost omare si lahko ogledamo na sliki 3.4. Za pravilno elektro vezavo smo si pomagali z elektro vezalnim načrtom, ki smo ga izdelali pri načrtovanju celotnega sistema (priloga A). Ker v kotlovnici ni veliko prostora za elektro omaro, je bila velikosti omare omejena (slika 3.5).



Slika 3.4: Električni elementi v elektro omari

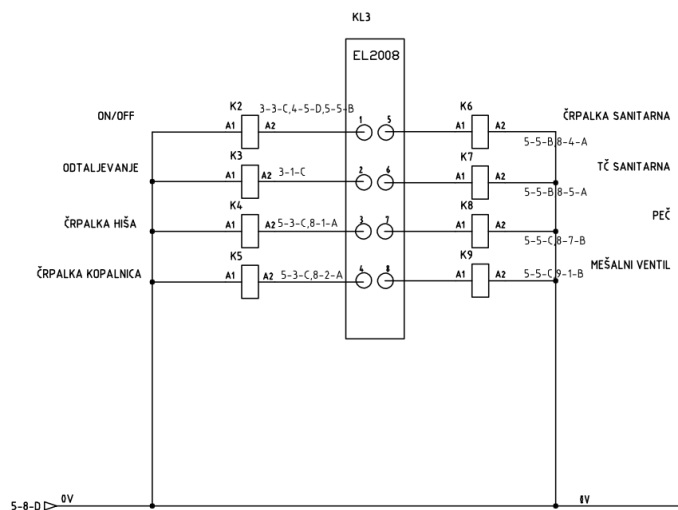


Slika 3.5: Mesto elektro omare v kotlovnici

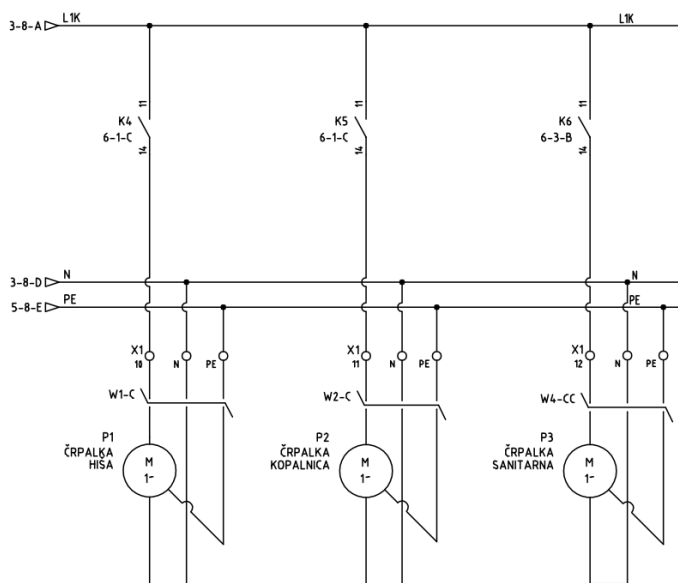
Vezava elektro omare se na grobo deli na dva dela. Prvi del je krmilni del z enosmerno električno napetostjo 24 V, drugi pa močnostni z izmenično napetostjo 230 V. Vrednost krmilne napetosti se je izbrala zato, ker sam krmilnik CX8080 za napajanje potrebuje enosmerno 24 V napetost. Da smo pridobili ustrezno napetost, je bilo potrebno v omaro vgraditi transformator, ki iz izmenične napetosti 230 V, ustvari 24 V enosmerne napetosti z maksimalnim električnim tokom 5 A. Da lahko z 24 V napetostjo vklopimo napravo, ki za napajanje potrebuje 230 V napetost potrebujemo rele. V krmilno vezavo elektro omare je vgrajenih 7 štiripolnih relejev. S krmilno napetostjo, ki pride iz izhodnega modula krmilnika, rele preklapimo, s tem pa sklenemo kontakte na močnostnem delu vezave in vklopimo ustrezno napravo. Na sliki 3.6 lahko vidimo, kako je na elektro vezavi prikazan priklop releja na izhodni signal krmilnika. Vsak digitalni izhod iz krmilniškega modula je priklopljen na tuljavo označenega releja. Na primer, digitalni izhod 3 je povezan na tuljavo releja K4, na kontakt A2. Da se električni tokokrog sklene in se rele preklapi, je potrebno drugi kontakt tuljave A1 priklopiti na vodnik s potencialom 0 V.

Pri močnostnem tokokrogu je potrebno poskrbeti, da imajo vsi večji porabniki svoje električne varovalke in ustrezne elektro elemente ki skrbijo za vklop in izklop naprav. Na sliki 3.7 je prikazan primer, kako so priklopljene obtočne črpalke. Vse obtočne črpalke so vezane na isto fazo. Vsaka črpalka je priklopljena na normalno odprt kontakt ustreznega releja, ki se po preklopu sklene, obtočna črpalka pa se zažene. V elektro omari so vgrajene tudi vrstne sponke. Vrstne sponke omogočajo, da lahko priklop naprave naredimo na začetku elektro omare, vse povezave znotraj omare pa so že dokončane in povezane na ustrezne zaščitne in prekladne elemente. Vrstne sponke so označene s številkami, ki jih lahko vidimo tudi na elektro načrtu.

V elektro omaro smo dodali elektro števec Countis E21 podjetja Socomec, ki beleži električno porabo celotnega ogrevalnega sistema. Nanj je bilo potrebno priključiti tri električne faze in ničelni vodnik. Elektro števec ima možnost priklopa pulznega izhoda. Da bi lahko spremljali električno porabo



Slika 3.6: Vezava digitalnih izhodov na tuljavo štiripolnih relejev



Slika 3.7: Vezava obtočne črpalke na kontakt releja

na samem krmilniku, smo pulzni izhod elektro števca priklopili na digitalni vhod krmilnika. V dokumentaciji elektro števca je napisano, da 1 impulz pomeni 0,1 kWh porabljene električne energije [9]. Na samem krmilniku smo implementirali funkcijski blok, ki šteje pulze in ustrezno povečuje stanje elektro števca. Računa se tudi dnevno porabo električne energije, razdeljeno na visoko tarifo in malo tarifo. Pri delovanju regulacijskega sistema smo stremeli k tem, da bi ogrevanje s toplotno črpalko obratovalo večino časa v mali tarifi, kar bi še dodatno zmanjšalo stroške ogrevanja. Težava pri tem je, da se ogrevanje ponavadi izvaja samo čez dan, ko je aktivna visoka tarifa. Zato so se urniki delovanja naprav nastavili tako, da zjutraj pregrejejo ogrevalni sistem, ko je še aktivna mala tarifa. Pri ogrevanju sistema s toplotno črpalko, je zelo pomembno kolikšna je aktivna električna moč. Ker sam elektro števec nima izhoda, ki bi predstavljal aktivno električno moč, smo si pomagali s prejetimi pulzi. Električna moč je definirana kot sprememba električne energije v času:

$$P = \frac{dW}{dt} \quad .$$

Spremembo energije W za 0,1 kWh v našem primeru predstavlja en impulz. Čas t v katerem se zgodi sprememba pa je časovna razlika med dvema prejetima impulzoma [10].

Poglavje 4

Razvoj programske opreme

Za razvoj programske opreme smo uporabljali razvojno okolje Beckhoff Twin-cat 2. Platforma je razdeljena na dva sklopa. Prvi sklop skrbi za pravilno konfiguracijo samega krmilnika in modulov (System Manager), drugi pa za programiranje krmilniškega programa (PLC Control) [11]. V sklopu System Manager določimo kateri vhod ali izhod na modulu se bo preslikal v katero vhodno izhodno spremenljivko. Vsak modul ima različno predstavitev podatkov, odvisno od tega čemu je modul namenjen. Naprimer, dodatni modul digitalnih vhodov EL1008, ima za vsak vhod posebej definiran en bit. Ker ima modul osem vhodov, lahko bite sestavimo v en bajt [12]. Zelo podobno predstavitev podatkov ima modul za digitalne izhode EL2008. En bit predstavlja en izhodni signal [13]. Modul za priključitev uporovnih temperaturnih tipal EL3208 ima za vsak vhod dva podatka. Oba podatka sta sestavljena iz dveh bajtov. Prvi podatek je sestavljen iz različnih statusnih bitov, kot naprimer upornost pod dovoljenim merilnim območjem temperaturnega tipala, upornost nad dovoljenim območjem, napaka tipala. Drugi podatek pa nam vrne meritev iz samega temperaturnega stikala, ki je že preračunana v temperaturo. Korak natančnosti merjenja je 0,1 °C [14]. Sklop PLC Control skrbi za samo programiranje krmilnika. Vse programske bloke lahko programiramo v različnih jezikih, kot sem že opisal v poglavju 3.1. Za programiranje smo si izbrali strukturiran tekst (ST), ki je najbolj podoben višje

programskim jezikom.

Razvoj celotnega projekta je potekal v večih fazah. Najprej smo sestavili elektro omaro in preverili, če je vezava pravilna. Nato smo se lotili programiranja avtomatizacije. Za vsak strojni element v kotlovnici smo ustvarili nov funkcijski blok, da bi kar se da poenostavili program. Najprej smo začeli z delovanjem obtočnih črpalk, nato z delovanjem mešalnega ventila vse do delovanja toplotne črpalke. Po sestavi celotnega programa smo vso delovanje preizkusili in se lotil menjave elektro omare. Napeljali smo vso potrebno napeljavo za vsa temperaturna tipala in internetno komunikacijo. Po vsem programerskem delu, smo se posvetili še izdelavi vizualizacije.

4.1 Krmiljenje obtočnih črpalk

Pri prejšnji regulaciji so se za vklop in izklop obtočnih črpalk uporabljali termostati. V vsaki ogrevalni veji je bil po en termostat, na katerem se je lahko nastavilo željeno temperaturo, histereza pa je bila odvisna od vsakega termostata posebej. Pri tem je bil odziv sistema ogrevanja zelo počasen, ogrevanje pa zato neučinkovito. Dejanske temperature v prostorih ali v zalogovniku so nihale med nastavljenno temperaturo in histerezo. V okviru projekta smo v vsako ogrevalno vejo namestili temperaturno tipalo. Pri sami namestitvi je bilo potrebno paziti, da tipala niso tik nad ogrevalnim elementom ali izpostavljena sončnim žarkom, kar bi vodilo do nepravilnega delovanja celotnega sistema ogrevanja. V novem sistemu smo implementirali dva sistema regulacije za vklop obtočnih črpalk. Prvi deluje po enakem principu kot termostat, drugi pa s pomočjo regulatorja izračuna potrebno temperaturo ogrevalne vode in krmili delovanje obtočnih črpalk s pulzno frekvenčno modulacijo. Med njima lahko preklapljammo iz vizualizacije za vsako posamezno ogrevalno vejo. Primarno se uporablja sistem s pulzno modulacijo, če pride do nepravilnega delovanja se preklopi na enostavnejši termostatski način. V obeh primerih lahko določimo željeno temperaturo glede na nastavljene urnike.

```
(*Potreba za ogrevanje*)
IF rTemp >= nŽeljena THEN
    bVklpCrp := FALSE;
ELSIF rTemp <= nŽeljena - nHist THEN
    bVklpCrp := TRUE;
END_IF
```

Slika 4.1: Implementacija termostatskega načina delovanja

Termostatski način deluje tako, da nastavimo željeno temperaturo in histerezo. Ko trenutna temperatura pade pod razliko željene temperature in histereze, se vklopi črpalka (slika 4.1). Črpalka deluje toliko časa, dokler trenutna temperatura ne preseže željene temperature, nato se izklopi. Problem tega načina je, da temperatura v prostoru zelo niha. Željeno temperaturo se samo doseže, vzdržuje se jo samo znotraj nastavljenе histereze. Že s takim načinom delovanja lahko zmanjšamo skupno porabo energenta za ogrevanje, saj lahko določamo kdaj se nam prostori grejejo in kakšna je trenutna željena temperatura.

Drugi, bolj zahteven način regulacije, je s pomočjo pulzne frekvenčne modulacije. Ker so vse obtočne črpalke vezane na isti razdelilec, je potrebno izbrati samo eno željeno temperaturo. Za vsako obtočno črpalko je potrebno s pomočjo regulatorja PID izračunati, kakšna je željena temperatura ogrevalne vode. Regulatorji ponavadi vrnejo vrednost, za koliko moramo spremeniti nek izvršilni člen, da se bo temperatura ustrezno povečala. Izvršilni deli so na primer mešalni ventili ali frekvenca delovanja obtočne črpalke. V našem primeru z izhodom regulatorja izračunamo željeno temperaturo ogrevalne vode, glede na posamezno ogrevalno vejo. Obtočne črpalke se lahko bodisi prižgejo, bodisi ugasnejo. Zato je potrebno, da ogrevanje prostorov reguliramo s pulzno frekvenčno modulacijo. Delovanje obtočnih črpalk razdelimo na časovni interval. Celoten del intervala bo delovala črpalka, ki potrebuje najvišjo temperaturo ogrevalne vode. Ostale obtočne črpalke pa bodo delovale samo del tega intervala, glede na razmerje med najvišjo izračunano temperaturo in njihovo izračunano temperaturo. Za izračun željene temperature sem si pomagal z regulatorjem PID [15]. Regulator PID je sestavljen

iz treh glavnih delov in sicer iz proporcionalnega (P), integracijskega (I) in diferencialnega dela (D). Za vsak del regulatorja se lahko določi, njegov vpliv na regulirno količino, v našem primeru temperaturo ogrevalne vode,

$$u(t) = P + I + D \quad .$$

Trenutna napaka se označi z $e(t)$. Predstavlja razliko med željeno in merjeno temperaturo v prostoru:

$$e(t) = T_{\text{željena}} - T_{\text{izmerjena}} \quad .$$

Proporcionalni del skrbi za odziv v trenutnem stanju. Njegov odziv je odvisen od razlike med željeno vrednostjo in merjeno temperaturo, tako imenovano napako. Izhod proporcionalnega regulatorja je napaka, ki je pomnožena z ojačanjem. Za proporcionalni del regulatorja velja enačba:

$$P = K_P e(t) \quad ,$$

kjer je K_P ojačanje proporcionalnega dela regulacije. Regulator torej z večanjem napake povečuje regulirno količino. Pri neprimerni izbiri ojačanja lahko sistem postane nestabilen in prične oscilirati. Glavna težava tega dela regulatorja je, da samo z njim v nekaterih primerih ne moremo doseči željene temperature.

Integralni del je odziv na dogajanje v preteklosti. To pomeni, da integralni del upošteva vse napake od začetka regulacije, do trenutnega stanja:

$$I = K_I \int e(t) dt \quad ,$$

kjer je parameter K_I ojačanje integralnega dela regulacije. S tem lahko zmanjšamo napako, če na sistem vpliva zunanja motnja. Dlje časa, kot bo motnja prisotna, večji bo odziv integracijskega dela. Zaradi seštevanja vseh dosedanjih napak, lahko izniči napake, ki jih sam proporcionalni del ne more. Slabost integracijskega regulatorja je v tem, da ko se motnja odstrani, je integracijski del visok, zato potrebuje nekaj časa, da se integral napake zmanjša.

Diferencialni del stremi k dogajanju sistema v prihodnosti. Odziv diferencialnega dela je odvisen od spremembe napake v času. Večja kot je sprememba napake, večji je odziv:

$$D = K_D \frac{de(t)}{dt} \quad ,$$

kjer je K_D ojačanje diferencialnega dela. Če se vrednost napake ne spreminja, je diferencialni del enak nič.

Ustrezno povečanje temperature ogrevalne vode je torej seštevek proporcionalnega, integralnega in diferencialnega dela. Ta seštevek je prištet trenutni temperaturi ogrevalne vode (slika 4.2) in tako dobimo izračunano željeno vrednost temperature ogrevalne vode. Ker lahko izračunana temperatura preseže maksimalno temperaturo, ki jo lahko zagotovi trenutna ogrevalna naprava je vrednost omejena na maksimalno temperaturo, ki jo lahko naprava doseže.

V primeru izračuna željene temperature ogrevalne vode smo morali upoštevati naslednje zahteve:

- odstopanje med dejansko in željeno temperaturo v prostoru slednjo čim prej doseči,
- temperaturo ogrevalne vode regulirati glede na potrebo ogrevanja v prostoru,
- upoštevati trend spreminjanja temperature v prostoru in trend zunanje temperature.

Če za primer vzamem ogrevalno vejo kopalnic, je ojačanje K_P enako 8. To pomeni, če je izračunana napaka $e(t)$ v danem trenutku 1 °C, je potrebno temperaturo ogrevalne vode povečati za 8 °C. Vrednost tega ojačanja sem pridobil s preizkušanjem, kako se sistem odzove na povečanje temperature ogrevalne vode. Ojačanje K_I smo v ogrevalni veji kopalnic najprej nastavili na 0,5. Izkazalo se je, da je vpliv integralnega dela na izhod celotnega regulatorja prevelik, zato smo ga zmanjšali na 0,1. Pravilen odziv diferencialnega

dela regulatorja v primeru ogrevanja kopalnic je zelo pomemben. Temperatura v kopalnici lahko hitro naraste, zato je potrebno ustrezno zmanjšati temperaturo ogrevalne vode. Ojačanje K_D smo nastavili na 2.

Ko imamo izračunane željene temperature ogrevalne vode, se lahko posvetimo pulzno frekvenčni modulaciji. Z regulatorjem PID smo izračunali željene temperature ogrevalne vode za posamezne ogrevalne veje. Vse obtočne črpalke so priključene na isti razdelilnik ogrevanja, zato ne moramo določati ogrevalne vode za posamezno ogrevalno vejo. Potrebno je določiti samo eno. Izmed vseh izračunanih temperatur izberemo maksimalno. Delovanje obtočnih črpalk razdelimo na časovne intervale. Obtočna črpalka z maksimalno izračunano temperaturo obratuje celoten časovni interval. Če je dolžina časovnega intervala na primer 5 minut, bo črpalka z maksimalno temperaturo obratovala 5 minut. Čas obratovanja ostalih obtočnih črpalk pa lahko izračunamo iz procentualne razlike temperature. Če izračunana temperatura predstavlja na primer 80 % maksimalne temperature, bo obtočna črpalka obratovala 80 % časovnega intervala. Časovni intervali ne smejo biti zelo kratki, ker s tem povzročimo veliko preklapov relejev. Življenska doba releja je odvisna od števila preklapov. Intervali ne smejo biti preveliki, saj se lahko zgodi, da ogrevan prostor med časovnim intervalom delovanja obtočne črpalke že doseže željeno temperaturo. Pri preizkušanju ogrevanja s pulzno frekvenčno modulacijo se je izkazalo, da so 5 minutni časovni intervali ustrezni. Izračun časovnega intervala je prikazan na sliki 4.3.

4.2 Krmiljenje naprav za ogrevanje

Pri segrevanju vode v ogrevalnem sistemu lahko ločimo problem na dva dela. Prvi del je segrevanje sanitarne vode, drugi pa ogrevanje prostorov v hiši. Pri ogrevanju sanitarne vode ne potrebujemo naprave z veliko ogrevalno močjo, ker toplotni izmenjevalec v zalogovniku ne ustvari velike temperaturne razlike. Za ogrevanje sanitarne vode se uporabljajo sončni kolektorji in manjša toplotna črpalka. Pri obstoječem sistemu se je lahko zgodilo, da sta obe ogre-


```

(*Računanje potrebne temperature ogrevalne vode*)
nCycleTime := 300; (*s*)
IF rtcTimer.data.T_5min AND bEco THEN
    (*računanje napake *)
    nErr := nZeljena - rTemp;
    (*računanje delov PID*)
    (*P*)
    P := nErr;
    (*I*)
    I := I + nErr * nCycleTime ;
    I := LIMIT(nlErrMin, I, nlErrMax);
    (*D*)
    D := (nErr - nLastErr)/nCycleTime;
    (*PID*)
    nlzracunanSP := tc.rTempIN + (nKp * P + nKi * I + nKd * D);

    nLastErr := nErr;
END_IF

```

Slika 4.2: Algoritem za izračun željene temperature ogrevalne vode

```

IF bEco THEN
    IF nlzracTemp > nMinOgrTemp THEN
        (*Časa obratovanja v časovnem intervalu v sekundah*)
        nSecDelo := REAL_TO_WORD((nlzracTemp / nMaxTemp) * nCasInt);
        timOn := DWORD_TO_TIME(1000*WORD_TO_DWORD(nSecDelo));
        tonDel(PT := timOn, IN := TRUE);
        mDel := tonDel.Q;
    END_IF
ELSE
    mDel := bVklon AND NOT bNapaka;
END_IF

```

Slika 4.3: Pulzno frekvenčno modulacija obtočne črpalke

valni napravi ogrevali vodo, čeprav to ne bi bilo potrebno. Iz dovoda sončnih kolektorjev je pritekla dovolj vroča voda za segrevanje sanitarne vode, ampak temperatura v zalogovniku je bila prenizka, zato je vodo ogrevala tudi toplotna črpalka. V ta namen smo namestili temperaturno tipalo na cev dovoda sončnih kolektorjev (slika 4.4). Če je temperatura na cevi za histerezo večja kot v zalogovniku, potem se lahko delovanje toplotne črpalke zaustavi. V primeru, ko je temperatura pod določeno minimalno vrednostjo, se ne glede na delovanje sončnih kolektorjev vklopi toplotna črpalka in segreje sanitarno vodo do željene temperature.

Sanitarna voda se lahko ogreva tudi iz glavnega razdelilnika. Vodo iz glavnega razdelilca dodatno ogreje sanitarna toplotna črpalka preden prispe do izmenjevalca v zalogovniku. To pomeni, da sanitarna toplotna črpalka ogreva tudi vodo v glavnem razdelilcu. Pri obstoječem sistemu se je lahko zgodilo, da se je v tem primeru prižgala tudi obtočna črpalka za gretje kopalnic. Ker je toplotna moč sanitarne toplotne črpalke premajhna da bi lahko ogrevala še kopalnico, se je ogrevala s sanitarno vodo. Radiatorji v kopalnici so bili mlačni, sanitarna voda pa je imela 30 °C. Pri novem sistemu se obtočna črpalka za kopalnico ne bo prižgala, dokler ogrevalne vode ne bo ogrevala toplotna črpalka ali kotel.

Za ogrevanje prostorov potrebujemo ogrevalno napravo z bistveno večjo ogrevalno močjo. V tem primeru se za ogrevanje uporablja toplotna črpalka ali kotel na kurilno olje. Napravi sta v sistem ogrevanja vezani zaporedno, ampak lahko deluje samo ena naprava naenkrat. Med dovodom toplotne črpalke in povratkom kotla je vgrajen mešalni ventil. Spreminja tok ogrevalne vode med glavnim razdelilcem ogrevanja in povratkom kotla. Tako omogoča, da ne prihaja do nepotrebnih izgub toplote na toplovodu od mešalnega ventila skozi kotel, vse do glavnega razdelilca. Vsaka od naprav ima svoje prednosti in slabosti. Toplotna črpalka za ogrevanje porabi veliko manj energije kot kotel, ampak lahko ogrevalno vodo segreje samo do 60 °C. Kotel lahko vodo ogreje tudi do 80 °C, zato se prostori v hiši veliko hitreje ogrejejo.

Toplotna črpalka (slika 4.5) je zelo občutljiva na vklope in izklope, zato je



Slika 4.4: Temperaturno tipalo na dovodu sončnih kolektorjev

potrebno omejiti čas minimalnega delovanja. Čas delovanja smo omejili na 20 minut, razen če toplotna črpalka v tem času doseže maksimalno temperaturo. Če bi omogočil delovanje nad maksimalno temperaturo, bi lahko prišlo do visokega tlaka. Za delovanje toplotne črpalke skrbi krmilnik Micro Chiller in elektronski ekspanzijski ventil podjetja Carel. Na krmilnik Micro Chiller so vezani vsi varnostni sistemi, ki skrbijo za pravilno delovanje toplotne črpalke. Za pravilno delovanje je potrebno na krmilnik priklopiti tudi temperaturna tipala in sicer na dovod in povratek izmenjevalca. Sam krmilnik omogoča komunikacijo Modbus preko vmesnika RS-485. Ker ima krmilnik CX8080 že vgrajen vmesnik za serijsko komunikacijo, lahko iz obeh krmilnikov beremo podatke, ki nas zanimajo. To bomo opisali v poglavju 4.3. Krmilnik Micro Chiller potrebuje za pravilno delovanje tudi dva digitalna vhoda. Prvi vhod je oddaljen vklop, preko katerega bomo vklapljali in izklapljali toplotno črpalko. Drugi vhod skrbi za odtaljevanje sistema. Pri nizkih zunanjih temperaturah se dogaja, da je potrebno enkrat ali dvakrat dnevno izvajati



Slika 4.5: Notranjost toplotne črpalke

odtaljevanje, ker se na zunanjem zračnem izmenjevalcu nabere led, okoliška energija se zato ne more prenesti na hladilni medij v sistemu. Zaradi tega toplotna črpalka ne zmore segrevati vode v ogrevalnem sistemu. Odtaljevanje zračnega izmenjevalca se izvede tako, da se delovanje toplotne črpalke obrne. Ogrevavno vodo hladimo, zračni izmenjevalec pa grejemo, dokler se nabran led ne stopi. Ko se zračni izmenjevalec dovolj pogreje, se delovanje toplotne črpalke povrne nazaj v ogrevanje. Omejen je tudi maksimalen čas delovanja toplotne črpalke na 2 uri. Če v tem času toplotna črpalka ne doseže željene temperature, se ogrevanje prav tako preklopi na kotel.

Kotel na kurilno olje (slika 4.6) ima že obstoječo regulacijo. Regulacija deluje na podlagi termostata, ki skrbi za vklop gorilca ob nastavljeni temperaturi dovodne vode v ogrevalni sistem. Da bi lahko kotel reguliral z novo regulacijo, je bilo potrebno nastavljeno temperaturo dvigniti na 80 °C. Termostat na stari regulaciji služi kot varnostno stikalo. Nova regulacija bo regulirala delovanje kotla s pomočjo na novo vgrajenega temperaturnega tipala na dovodni strani kotla v sistem. Ohranjeval bo željeno temperaturo



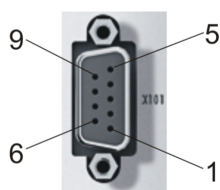
Slika 4.6: Kotel na kurilno olje

ogrevalne vode znotraj histereze 5 °C.

4.3 Protokol Modbus

V celotnem ogrevalnem sistemu so nameščeni trije krmilniki. Dva krmilnika, Micro Chiller in elektronski ekspanzijski ventil, skrbita za pravilno delovanje toplotne črpalke, krmilnik CX8080 pa za vso avtomatizacijo ogrevalnega sistema. Ker nas pri sami avtomatizaciji ogrevanja zanimajo tudi parametri delovanja toplotne črpalke, je potrebno podatke prenesti na krmilnik CX8080. Parametre bi lahko spremljali preko digitalnih izhodov krmilnika Micro Chiller, ki bi jih povezali na digitalne vhode krmilnika CX8080. Ker pa vsi krmilniki podpirajo komunikacijo Modbus, se lahko izognemo nepotrebnimi dodatnimi povezavami in med krmilniki povežemo samo vodnik za komunikacijo.

Protokol Modbus je v industriji zelo razširjena vrsta komunikacije. Modbus RTU je serijska komunikacija, ki lahko poteka preko vmesnika RS-232 ali



PIN	Meaning	Description	Signal
1	RS485	(+)	A
2	RxD (RS232)	Signal in	Receive Data
3	TxD (RS232)	Signal out	Transmit Data
4	+ 5 V	+	Vcc
5	GND	Ground	Ground
6	RS485	(-)	B
7	RTS (RS232)	Signal out	Request to Send
8	CTS (RS232)	Signal in	Clear to Send
9	GND	Ground	Ground

Slika 4.7: Priklop ustreznih nožic na konektor DB-9

RS-485 [16]. Krmilnik CX8080 podpira oba vmesnika, Micro Chiller in elektronski ekspanzijski ventil pa podpirata samo RS-485. Način komunikacije je gospodar-suženj. Da lahko komunikacija teče, mora med napravami obstajati povezava. Za prenos podatkov sta potrebni samo dve električni žili (A+ in B-). Priklop serijskega vmesnika prikazuje slika 4.7. Branje iz naprav je enostavno. Gospodar ima vse podatke, ki jih nudi zapisane v vnaprej definiranih registrih. Za branje spremenljivke potrebujemo samo naslov registra. Vsaka od naprav, ki podpira Modbus komunikacijo, potrebuje izmenjevalno tabelo. V tabeli je za vse spremenljivke zapisano na katerem registru se nahajajo in kaj pomeni njihova vrednost. Primer tabele za krmilnik Micro Chiller lahko vidimo v tabeli 4.1.

Za branje teh podatkov je potrebno uporabiti funkcijo readInputRegisters. Funkcija potrebuje nekaj vhodnih parametrov. Vsaka naprava na vodilu komunikacije potrebuje svoj unikaten naslov Modbus. Krmilnik Micro Chiller ima naslov 2, elektronski ekspanzijski ventil pa naslov 3. Za vsako branje je potrebno določiti, iz katerega registra se začne branje in koliko podatkov želimo prebrati. Ker sta na krmilnik Micro Chiller priključeni tem-

Tabela 4.1: Primer Modbus izmenjevalne tabele

Spremenljivka	Naslov	Predstavitev
Probe B1	102	x10 °C
Probe B2	103	x10 °C
Probe B3	104	x10 bar
Probe B4	105	%

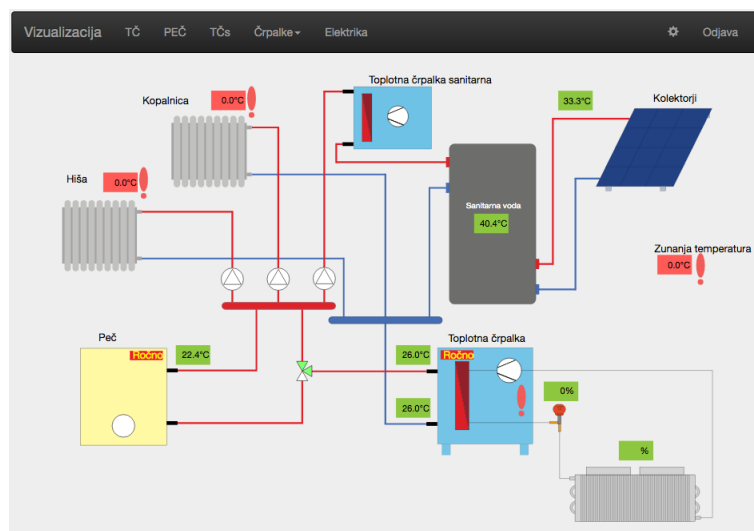
peraturi dovoda in povratka v toplotno črpalko, bomo za potrebo regulacije ciklično prebirali vrednosti temperatur s komunikacijo Modbus. Temperatura povratka se nahaja v registru 102, temperatura dovoda pa se nahaja v registru 103. Te dve vrednosti predstavljata temperaturo pomnoženo z 10, kar pomeni, da imata temperaturi eno decimalno mesto. Parametri za branje podatkov bodo sledeči: naslov Modbus je enak 2, začetni register branja je 102, število željenih podatkov pa je 2. Zraven podatkov o temperaturi, krmilnik nudi še status napak. Če na toplotni črpalki pride do kakršne koli napake, se ogrevanje preklopi na kotel. Krmilnik elektronskega ekspanzijskega ventila regulira odprtost ekspanzijskega ventila. Regulira se s pomočjo temperaturnega tipala in tlačnega tipala. Iz njega preko komunikacije Modbus preberemo temperaturo, tlak na sesalni strani kompresorja, pregretje toplotne črpalke in stopnjo odprtosti ekspanzijskega ventila v procentih.

4.4 Vizualizacija

Pri izdelavi vizualizacije sistema je bil glavni cilj, da se čim bolj poenostavi uporaba sistema in ponudi uporabniku celovit nadzor nad ogrevalnim sistemom. Celotna vizualizacija je izdelana v označevalnem jeziku za spletno strani HTML, skupaj s programskim jezikom JavaScript. Do vizualizacije lahko dostopamo preko spletnega brskalnika lokalno ali globalno. Za globalni dostop do vizualizacije smo vzpostavili strežnik VPN (angl. Virtual Private Network), ki omogoča virtualni dostop do privatnega omrežja. Strežnik deluje s pomočjo protokola PPTP (angl. Point-to-Point Tunneling Protocol),

ki je eden izmed bolj enostavnih, a ne tako varnih protokolov za vzpostavitev varnega tunela. Ta protokol smo izbrali zato, ker se lahko na sam strežnik povežeš že s pametnim telefonom [17]. Vizualizacija se izvaja na spletnem strežniku, ki ga ima krmilnik CX8080. Da lahko prebiramo informacije iz programskega dela krmilnika, je bilo potrebno urediti spletno storitev TcAdsWebService. Beckhoff je znotraj instalacijskega direktorija TwinCAT dodal tudi storitev TcAdsWebService, ki jo je bilo potrebno prenesti na krmilnik v ustrezno mapo. Storitev TcAdsWebService omogoča komunikacijo po protokolu ADS preko protokola HTTP, s katerim je lažje diagnosticirati delovanje krmilnika in urediti vizualizacijo. Komunikacija ADS (angl. Automation Device Specification) se uporablja znotraj celotnega sistema TwinCAT. Z njo lahko krmilniki komunicirajo med sabo, omogoča pa tudi prenos datotek iz enega krmilnika na drugega in še mnogo drugih stvari [18]. Storitev TcAdsWebService je opisana v strukturni obliki WSDL (angl. Web Services Description Language). Oblika WSDL predpisuje, kakšne so metode spletne storitve in kakšni so odgovori na posamezne poslane zahteve [19]. Beckhoff je izdelal knjižnico v spletnem programskem jeziku JavaScript, ki že omogoča vso interakcijo s storitvijo TcAdsWebService, zato smo jo pri svoji vizualizaciji uporabili.

Za izdelavo vizualizacije ali drugače rečeno spletne strani, smo uporabili tekstovni urejevalnik Sublime Text. Sama oblika spletne strani je narejena z odprtokodnim spletnim ogrodjem Bootstrap, ki omogoča odzivno spletno obliko [20]. Oblika se prilagaja na velikost zaslona naprave s katerim dostopamo do strani. Spletna stran vizualizacije je razdeljena na tri različne dele in sicer na shemo celotnega sistema, podstrani vseh naprav in nastavitve delovanja ogrevalnega sistema. Glavna stran prikazuje strojno inštalacijo ogrevalnega sistema, skupaj s trenutnimi podatki o delovanju naprav in vrednostmi merjenih temperatur na določenih mestih (slika 4.8). Vsaka izmed naprav ima svojo podstran, na kateri so prikazani vsi dodatni parametri (slika 4.9). Ker je celotna stran v odzivni obliki, je strojna shema na domači strani narisana v vektorskem formatu SVG, ki se lahko prilagaja glede velikosti na-

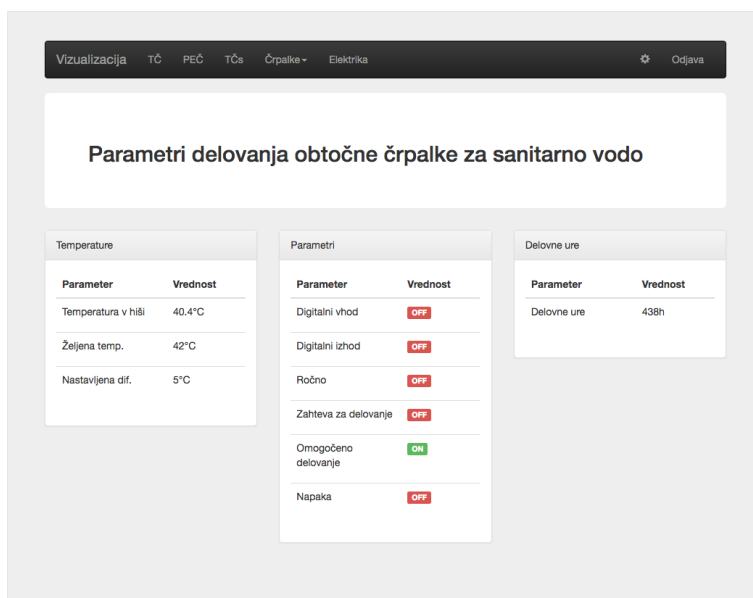


Slika 4.8: Glavni zaslon vizualizacije

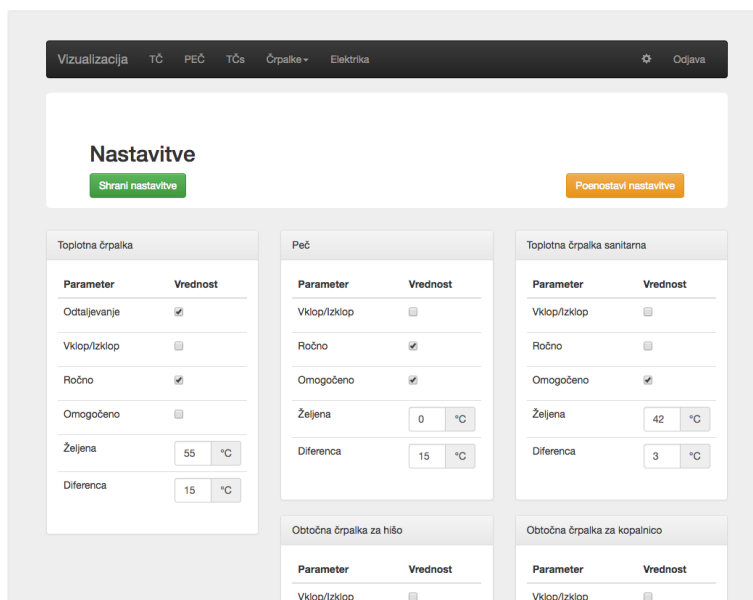
prave. Sama shema prikazuje stanja naprav, morebitne napake na napravah in režim obratovanja naprav. Za vsa prikazovanja ustreznih elementov in osveževanja temperatur skrbi ogrodje AngularJS. Na strani nastavitve (slika 4.10) lahko parametriramo celotno delovanje sistema in vseh naprav v njem.

Pri izdelavi vizualizacije, je bilo najzahtevnejše ustvariti razred `PLCCom`, ki bo uporabljal storitev `TcAdsWebService`, hkrati pa delil podatke z ogrodjem AngularJS. AngularJS je strukturirano ogrodje za dinamične spletne aplikacije. Med drugim omogoča, razširitev sintakse HTML z injektiranjem podatkov iz same aplikacijske strani, skrivanjem in prikazovanjem objektov DOM (angl. Document Object Model), ponavljanje objektov DOM znotraj zanke [21]. AngularJS je sestavljen iz aplikacij in kontrolerjev. Vsaka aplikacija ima lahko več kontrolerjev, vsak kontroler pa ima svoje imensko polje za svoje spremenljivke. Vsaka podstran na vizualizaciji je svoj kontroler, s svojimi spremenljivkami, ki jih želimo prebrati iz programa krmilnika in jih prikazovati na vizualizaciji. Če želimo spremenljivko prikazati in prebrati iz krmilnika, potrebujemo naslednje parametre:

- ime,



Slika 4.9: Dodatni parametri obtočne črpalke za sanitarno vodo



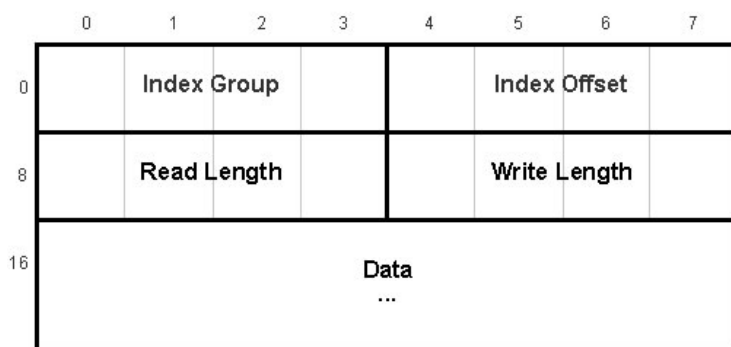
Slika 4.10: Nastavitve celotnega ogrevalnega sistema

```
{
  ".temperature.pecOutTemp" : {
    size: 4,
    dataType: "REAL",
    value : 0.00,
    changed : false,
    handle : {},
    discription : "Dovod"
  }
}
```

Slika 4.11: Primer parametrov za razred PLCCom

- podatkovni tip,
- velikost podatka v bajtih in
- opis spremenljivke.

Te parametre je potrebno posredovati razredu PLCCom preko parametrov pri klicu inicializacijske metode (slika 4.11). Ta metoda najprej ustvari vse potrebne instance, ki se bodo kasneje uporabljale v razredu PLCCom, nato sestavi prvi ukaz, ki se pošlje preko komunikacije ADS do krmilnika. Če hočemo iz samega krmilnika prebrati spremenljivko, potrebujemo naslov, ki nam pove kje v samem pomnilniku krmilnika se spremenljivka nahaja. To lahko naredimo na dva načina. Prvi način je, da že v programu krmilnika ob deklaraciji spremenljivke zapišemo pomnilniški naslov. Ta način ni najboljši. Lahko se zgodi, da spregledamo že uporabljen naslov pri eni od deklariranih spremenljivk in ga uporabimo pri drugi. To pa pomeni, da bi se spremenljivki med seboj prepisovali. Drugi način je bolj enostaven in tudi bolj zanesljiv. Komunikacija ADS omogoča, da lahko vsaki spremenljivki pripišemo svoj kazalec (ang. handle), ki se sklicuje na določeno spremenljivko. Prvi ukaz pri inicializacijski metodi, zahteva vse kazalce spremenljivk, ki jih je potrebno prikazati na vizualizaciji. Kazalec bi lahko zahtevali za vsako spremenljivko posebej, ampak se to v našem primeru ne bi obneslo, ker bi trajalo predolgo. Komunikacija omogoča grupiranje ukazov. To pomeni, da lahko z eno po-



Slika 4.12: Oblika poslanega paketa readWrite

slano zahtevo, dobimo kazalce za vse zahtevane spremenljivke, kar bistveno poveča hitrost prenosa.

Metode, ki jih lahko uporabljamo za komunikacijo so branje, pisanje in branje-pisanje (metoda readWrite). Vsaka od metod ima svojo obliko poslanega paketa, najbolj uporabljena metoda pa je metoda readWrite. Ta metoda pošlje zahtevo na krmilnik, krmilnik zahtevo predela tako kot določata polji Index Group in Index Offset, nato vrne ustrezen odgovor. Zgradba paketa je prikazana na sliki 4.12. Za grupiranje ukazov in readWrite funkcijo je potrebno v Index Group zapisati vrednost 0xF082 (ime funkcije ADSI-GRP_SUMUP_READWRITE), v IndexOffset pa število grupiranih ukazov znotraj podatkovnega območja paketa. Znotraj podatkovnega dela paketa (angl. data) so naštetni vsi grupirani ukazi sestavljeni iz ločenih readWrite ukazov, obliko zapisa pa določa IndexGroup. Kot lahko razberemo iz delčka kode na sliki 4.13, vidimo, da so najprej zapisani vsi parametri klicanih ukazov, šele nato vrednosti spremenljivk, ki jih želimo prebrati. V polje IndexGroup zapišemo vrednost 0xF003 (Symbol Handle By Name), ki pomeni da nam na podlagi podanega imena spremenljivke vrne kazalec, če v IndexOffset zapišemo 0 [22]. Sestavljen paket pošljemo krmilniku, nato čakamo na odgovor.

Krmilnik glede na določene parametre izvede vse ukaze znotraj poslanega paketa. Ukaze izvaža enega za drugim, kot da bi to bili posamezni ukazi. Od

```
for(var j in handlesList){ // Grupiranje ukazov; Funkcija posameznega ukaza
    buffer.wDINT(0xF003); // IndexGroup = 0xF003; Dobi ročaj glede na ime
    buffer.wDINT(0); // IndexOffset = 0;
    buffer.wDINT(4); // ReadLen = 4; Pricakovana velikost; Velikost ročaja 4 byte;
    buffer.wDINT(j.length); // Dolyina imena;
}

for(var j in handlesList){ // Posamezni podatki za ukaz
    buffer.wString(j); // Imena spremenljivk
}
```

Slika 4.13: Struktura grupiranih podatkov funkcije 0xF082

vsakega ukaza si zapomni ali je pri izvajanju prišlo do napake, kakšna je dolžina vrnjenega podatka in kazalec kje se nahaja spremenljivka. Vse to sestavi v nov paket in ga vrne inicializacijski metodi. Metoda v prejetem paketu preveri, če so se vsi ukazi izvedli uspešno in zapiše ustrezne kazalce k ustreznim spremenljivkam.

Ko imamo vse potrebne kazalce, se lahko lotimo branja podatkov. Branje podatkov se na isti strani ne bo spreminjalo, zato lahko samo enkrat sestavimo skupno zahtevo za branje podatkov. Zahteva za branje je podobna zahtevi za inicializacijo kazalcev spremenljivk. Tokrat uporabimo funkcijo branja. Pri funkciji branja v IndexGropu zapišemo vrednost 0xF080 (ime funkcije ADSIGRP_SUMUP_READ). Znotraj podatkovnega dela, pa je oblika grupiranih ukazov enaka. V polje IndexGroup je potrebno vnesti 0xF005 (Symbol Value By Handle), v polje IndexOffset pa vrednost kazalca spremenljivke. Krmilnik prejme paket, izvede vse naštete ukaze in vrne ustrezen odgovor. Ko se podatki uspešno preberejo, v imenskem prostoru kontrolerja AngularJS posodobimo parametre, ki smo jih posredovali na začetku inicializacijske metode. V parametru Value je zapisana prebrana vrednost iz krmilnika. AngularJS nato poskrbi, da se prebrana vrednost posodobi znotraj elementov DOM. V primeru parametrov, ki so prikazani na sliki 4.11, bi injektor AngularJS zgledal tako, kot je prikazano na sliki 4.14.

Parameter number določa, na koliko decimalk bo zaokrožena vrednost prikazane spremenljivke. Ker je strojna shema na glavni strani vizualizacije narejena v formatu SVG, lahko posamezne dele sheme skrijemo ali prikažemo.

```
{{['.temperature.pecOutTemp'].value | number:1}}
```

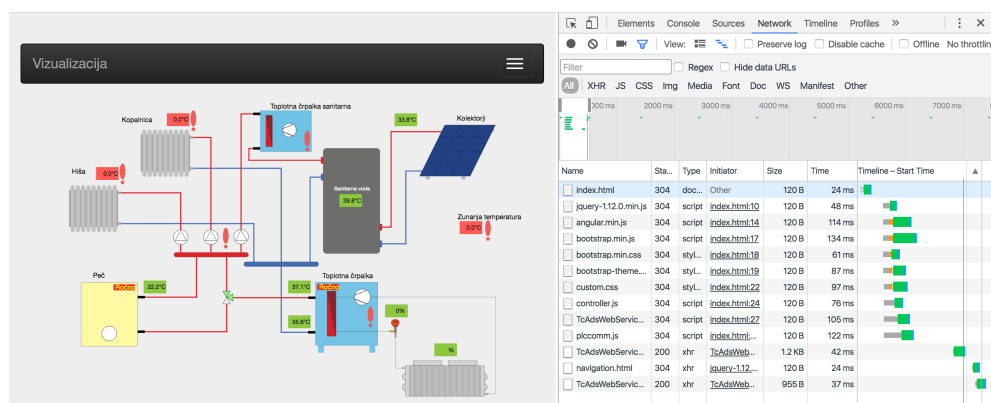
Slika 4.14: Uporaba injektorja AngularJS

```
<rect ng-if="['.pecOutTemp_Izp_DA'].value"  
      fill="red" width="79.4" height="45"/>
```

Slika 4.15: Uporaba funkcije ng-if

Ogrodje AngularJS vsebuje funkcijo ng-if. Ta funkcija glede na vrednost spremenljivke objekt DOM prikaže ali skrije. Primer uporabe funkcije ng-if lahko vidimo na sliki 4.15.

Podatki se na sami vizualizaciji preberejo in osvežijo samo enkrat. Za osveževanje podatkov sem ustvarili enostavno funkcijo, ki na vsako sekundo sproži funkcijo branja podatkov iz krmilnika. Za prvo nalaganje celotne vizualizacije je potrebno 970 ms in 3,4 kB prenesenih podatkov (slika 4.16). Ker se pri naslednjih osvežitvah podakov posodobijo samo zahtevani podatki se čas zahteve bistveno zmanjša. Osveževanje podatkov traja 35 ms, prenese pa se 955 B podatkov.



Slika 4.16: Hitrost prvega nalaganja spletne strani

Poglavje 5

Sklepne ugotovitve

V diplomskem delu je predstavljena izvedba avtomatizacije ogrevalnega sistema. Glavni namen celotnega projekta je bil zmanjšati stroške ogrevanja. V sistemu sta dve glavni ogrevalni napravi in sicer toplotna črpalka in kotel na kurilno olje. Primarna naprava ogrevanja je toplotna črpalka. Njeno delovanje je zelo odvisno od zunanjih pogojev. Zato je bilo potrebno poiskati območje učinkovitega ogrevanja s toplotno črpalko. Kadar ogrevanje s toplotno črpalko ni učinkovito, se uporabi kotel na kurilno olje. Te pogoje smo določili s spremljanjem delovanja ogrevalnega sistema v izdelani spletni vizualizaciji. Vsaka ogrevalna veja na podlagi izmerjene temperature v prostoru regulira delovanje obtočne črpalke. Opisana sta dva možna načina regulacije delovanja obtočnih črpalk in sicer termostatska regulacija in regulacija PID.

Za izbiro strojne opreme smo porabili kar nekaj časa, a na koncu se je izkazalo, da smo izbrali dobro. Največjo skrb so predstavljala temperaturna tipala Pt-100 in njihova natančnost. Zaradi dolžine napeljav do nekaterih tipal smo pričakovali veliko napako pri meritvi temperature. Izkazalo se je, da lahko s kalibracijo tipal dosežemo dovolj natančno meritev. Krmilnik za celotno delovanje uporablja 10 % procesorskega časa in je za trenutno avtomatizacijo preveč zmogljiv, ampak se bo v sami stavbi najverjetneje še kaj avtomatiziralo. Pri izdelavi samega programskega dela ni bilo veliko težav. Program je sestavljen iz posameznih programskih blokov, zato smo

lahko delovanje vsakega posebej preizkusili. Po implementaciji in testiranju vseh posameznih blokov, smo se lotili implementacije vseh delov v eno celoto. Po postavitvi in zagonu celotnega sistema smo izdelali spletno vizualizacijo, s katero smo lahko spreminjali nastavitve posamezne naprave, hkrati pa preverili, če se sistem ustrezno odzove na spremembe. Vizualizacija pripomore, da lahko daljinsko vklopimo ogrevanje prostorov, čeprav nas ni v hiši. Ogrevanje prostorov in sanitarne vode na željeno temperaturo je veliko bolj odzivno, temperatura v prostorih je konstantna. Na podlagi nastavljenih parametrov izračunamo ustrezno temperaturo ogrevalne vode. Tako ne prihaja do nepotrebnih visokih temperatur ogrevalne vode, ki bi povzročale pregrevanje sistema.

Po delovanju sistema v zadnjih mesecih imamo za enkrat še premalo podatkov, da bi lahko natančno določili ali se je poraba energenta zmanjšala ali ne. Če primerjamo podatke porabe električne energije z prejšnjimi porabami, kjer je povprečna mesečna temperatura podobna, je poraba električne energije padla za približno 20 %. Ta ocena je zelo groba, saj ne vemo koliko je bilo sončnega obsevanja za posamezni mesec. Naslednji korak za povečanje prihrankov je reguliranje toplote v vsakem posameznem prostoru. S tem naj bi prihranili dodatnih 10 % energije. Na vsakem radiatorju bi bilo potrebno zamenjati ročni ventil s termostatskim. Vračilna doba investicije pri zmanjšanju porabe energije za 10 %, bi bila 2 ogrevalni sezoni.

Z novo avtomatizacijo je delovanje posameznih naprav bolj energetsko učinkovito. Uporablja se najbolj primerna naprava pri trenutnih pogojih. Napake, ki so se v prejšnjem sistemu pojavljale so sedaj odpravljene. V sistem ogrevanja se lahko doda nova ogrevalna naprava, programski del pa se enostavno nadgradi. Da bo delovanje sistema kar se da optimizirano, bo potrebno vložiti še nekaj dodatnega časa za nastavljanje pravih parametrov temperature ogrevalne vode, s tem pa se bo energetska učinkovitost še povečala.

Literatura

- [1] Research on building automation and intelligent building design in the zafh.net research network Presentation and Introduction to the poster Exhibition [Online] Dosegljivo:
http://www.polycity.net/abschlusskonferenz/files/06_adlhoch-eicker_bollin.pdf [Dostopano 22.9.2018],
- [2] Toplotne črpalke [Online] Dosegljivo:
<http://gcs.gi-zrmk.si/Svetovanje/Clanki/Grobovsek/PT17.htm> [Dostopano 8.9.2016],
- [3] Sodobni kotli na kurilno olje [Online] Dosegljivo:
<http://gcs.gi-zrmk.si/Svetovanje/Clanki/Grobovsek/PT299.htm> [Dostopano 8.9.2016],
- [4] Dimenzioniranje ogreval pri nizkotemperaturnem ogrevanju [Online] Dosegljivo :
[ttp://gcs.gi-zrmk.si/Svetovanje/Clanki/Grobovsek/PT179.htm](http://gcs.gi-zrmk.si/Svetovanje/Clanki/Grobovsek/PT179.htm) [Dostopano 10.9.2016],
- [5] Priprava tople sanitarne vode [Online] Dosegljivo:
<http://gcs.gi-zrmk.si/Svetovanje/Clanki/PDFknjiznjicaAURE/IL1-16.PDF> [Dostopano 10.9.2016],
- [6] Beckhoff CX8080 Embedded PC with RS232/RS485 Interface [Online] Dosegljivo:

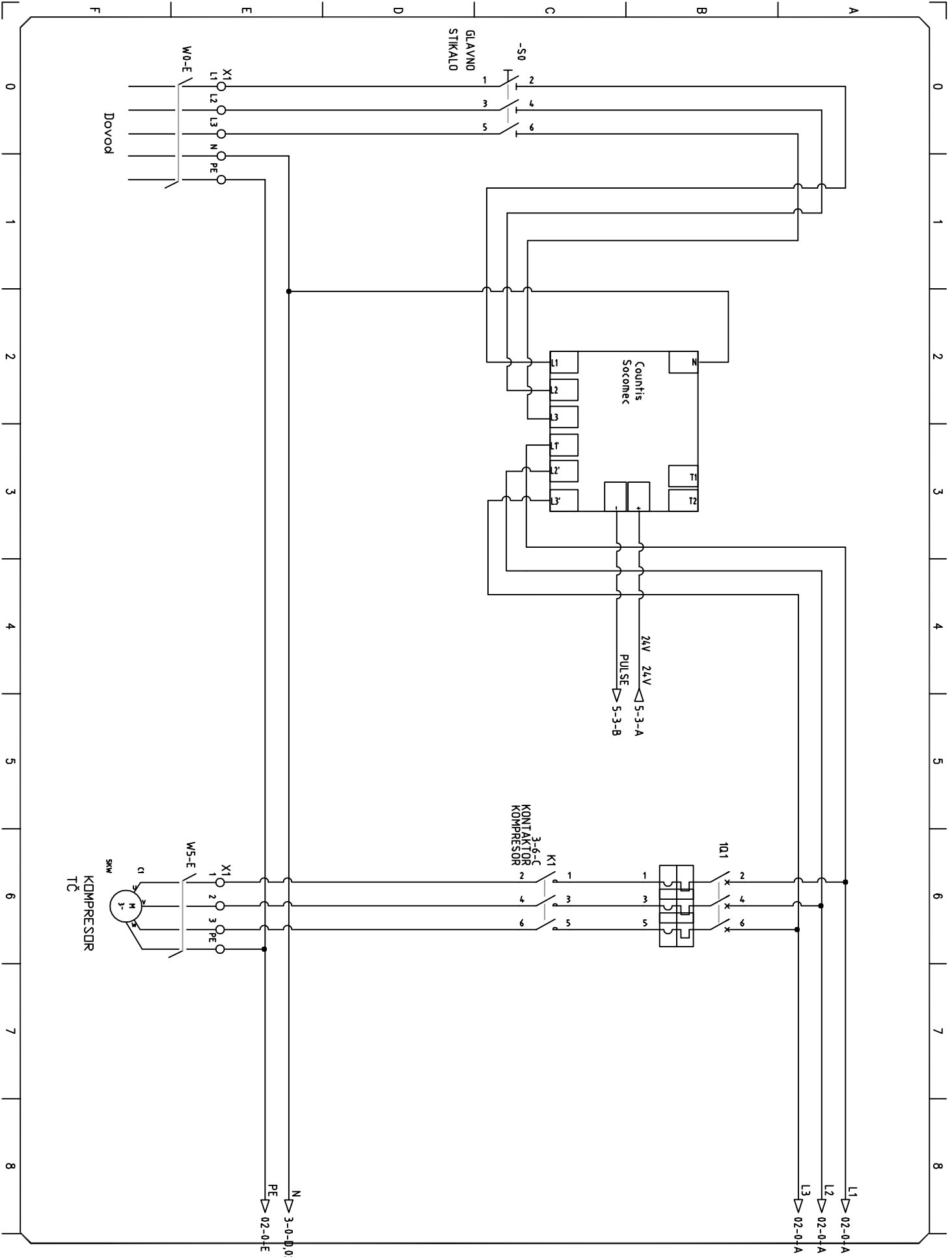
- https://download.beckhoff.com/download/document/ipc/embedded-pc/embedded-pc-cx/cx8080_hwen.pdf [Dostopano 10.9.2016],
- [7] Building blocks of IEC 61131-3 [Online] Dosegljivo:
<http://goo.gl/wUUKuj> [Dostopano 11.9.2016],
- [8] Temperaturna tipala in temperaturni senzorji [Online] Dosegljivo :
http://www.materm.si/temperaturna_tipala_temperaturni_senzorji [Dostopano 19.9.2016],
- [9] Socomec Countis E21 [Online] Dosegljivo:
http://www.socomec.si/files/live/sites/systemsite/files/SCP/6_gestion_energie/countis/countis_e/877065b_E20-21.pdf [Dostopano 19.9.2016],
- [10] Zdravko Žalar, "Osnove elektrotehnike", Ljubljana : Tehniška založba Slovenije, 1985,
- [11] TwinCAT 2 [Online] Dosegljivo:
<https://www.beckhoff.com/english.asp?twincat/default.htm> [Dostopano 13.9.2016],
- [12] EL1008 [Online] Dosegljivo:
<https://www.beckhoff.com/english.asp?ethercat/el1008.htm> [Dostopano 11.9.2016],
- [13] EL2008 [Online] Dosegljivo:
<https://www.beckhoff.com/english.asp?ethercat/el2008.htm> [Dostopano 11.9.2016],
- [14] EL3208 [Online] Dosegljivo:
<https://www.beckhoff.com/english.asp?ethercat/el3208.htm> [Dostopano 11.9.2016],
- [15] Golli, Drago Karol, "Avtomatizacija klimatizacijskih naprav", Ljubljana, Fakulteta za strojništvo, 1986,

-
- [16] Modbus protocol [Online]. Dosegljivo:
http://modbus.org/docs/PI_MBUS_300.pdf [Dostopano 15.9.2016],
 - [17] Point-to-Point Tunneling Protocol (PPTP) [Online] Dosegljivo:
<https://www.ietf.org/rfc/rfc2637.txt>,
 - [18] TwinCAT ADS WebService [Online] Dosegljivo:
<https://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/tc-sample-tcadswebservicejs/html/intro.html> [Dostopano 18.9.2016]
 - [19] Web Services Description Language (WSDL) 1.1 [Online] Dosegljivo:
<https://www.w3.org/TR/wsdl> [Dostopano 18.9.2016]
 - [20] Getting started with Bootstrap [Online] Dosegljivo:
<http://getbootstrap.com/getting-started/> [Dostopano 12.9.2016],
 - [21] What is Angular? [Online] Dosegljivo:
<https://docs.angularjs.org/guide/introduction> [Dostopano 12.9.2016],
 - [22] ADS Commands [Online] Dosegljivo:
<http://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/tcad-samsspec/html/tcad-samsspec-adscmds.htm&id=>

Priloge

Priloga A

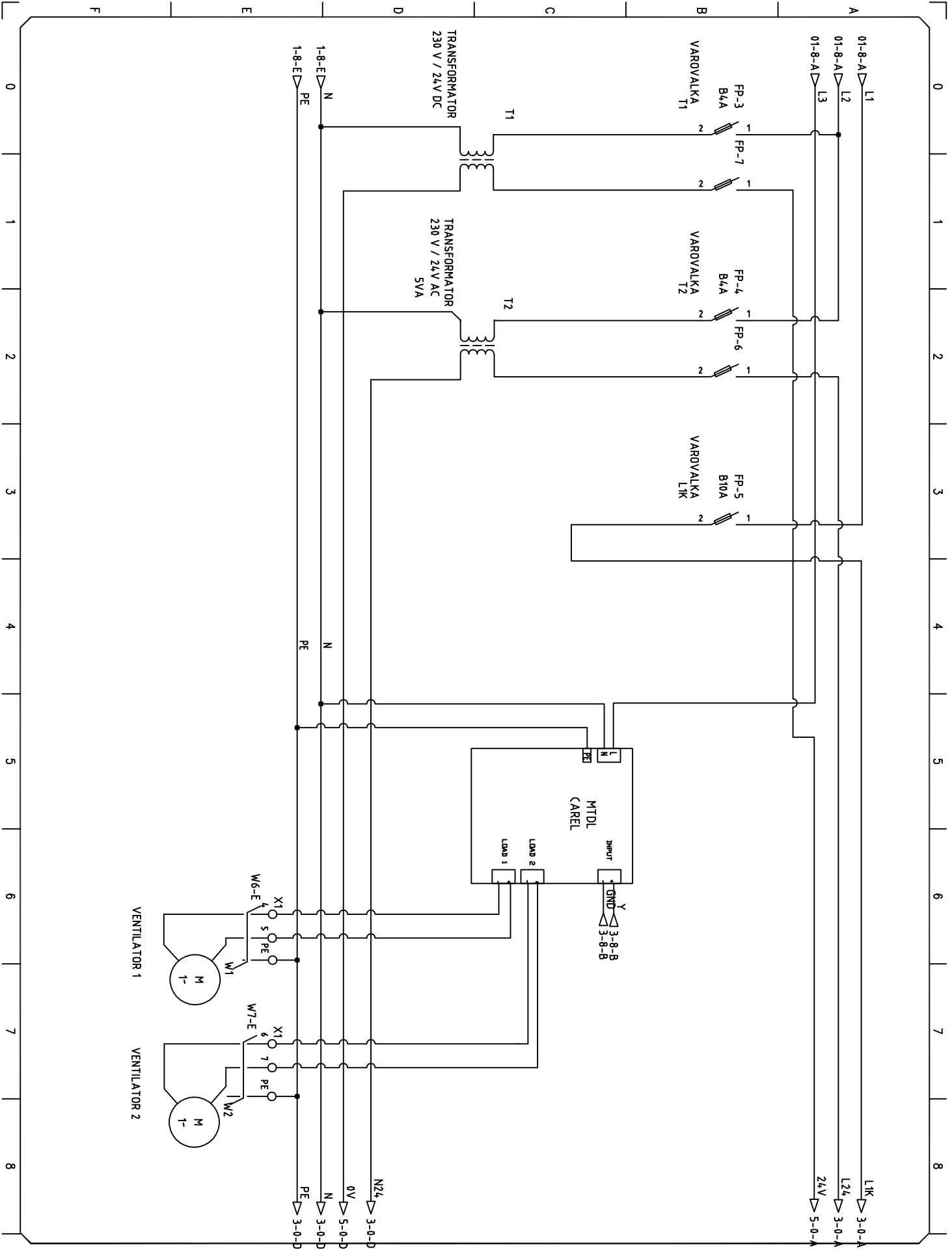
Vezalni načrt elektro omare



Autodesk

NO.	DATE	REVISION	BY

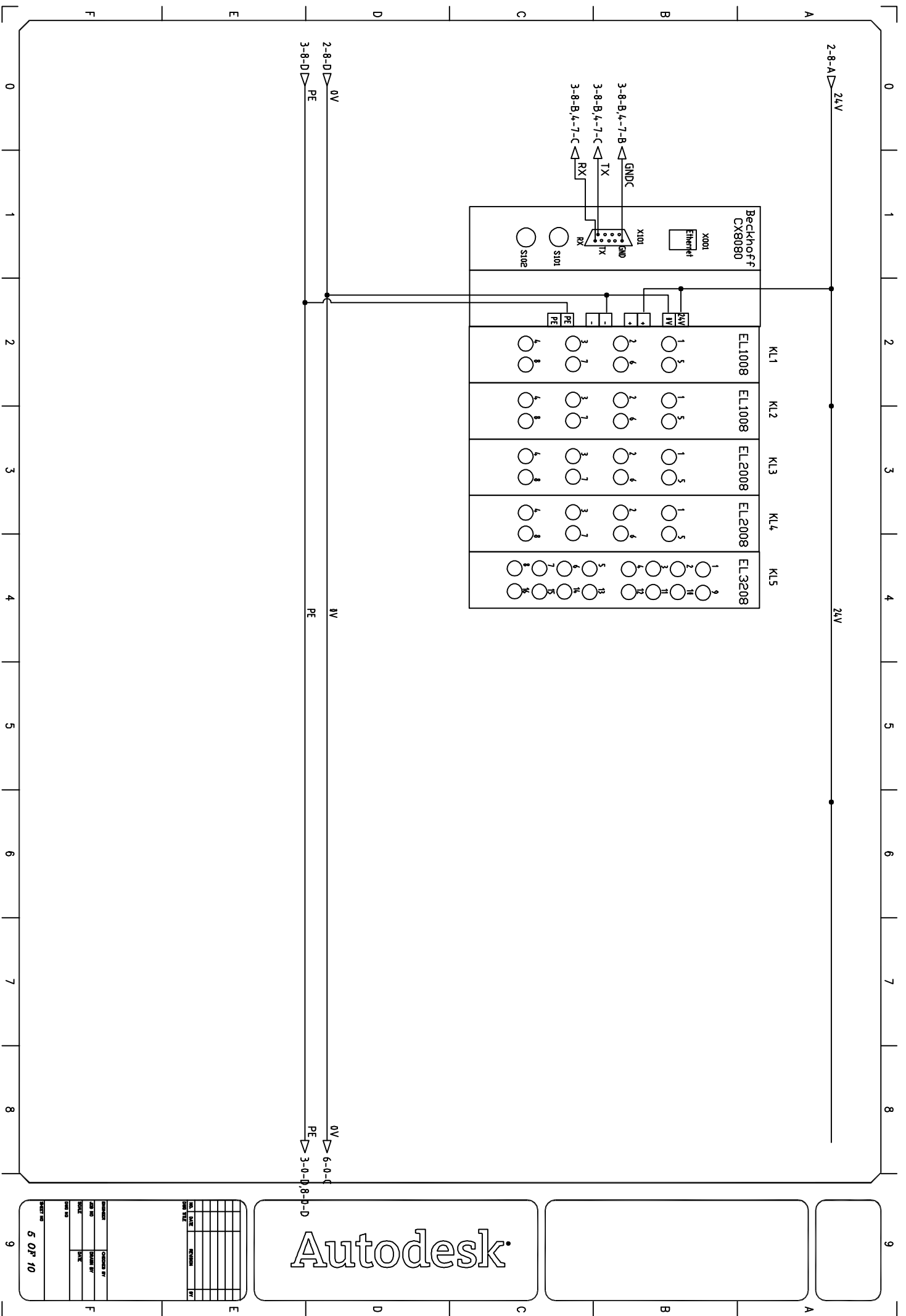
DESIGNED BY	CHECKED BY
DRAWN BY	APPROVED BY
DATE	DATE
NO. OF SHEETS	TOTAL SHEETS
SHEET NO.	SHEET TOTAL

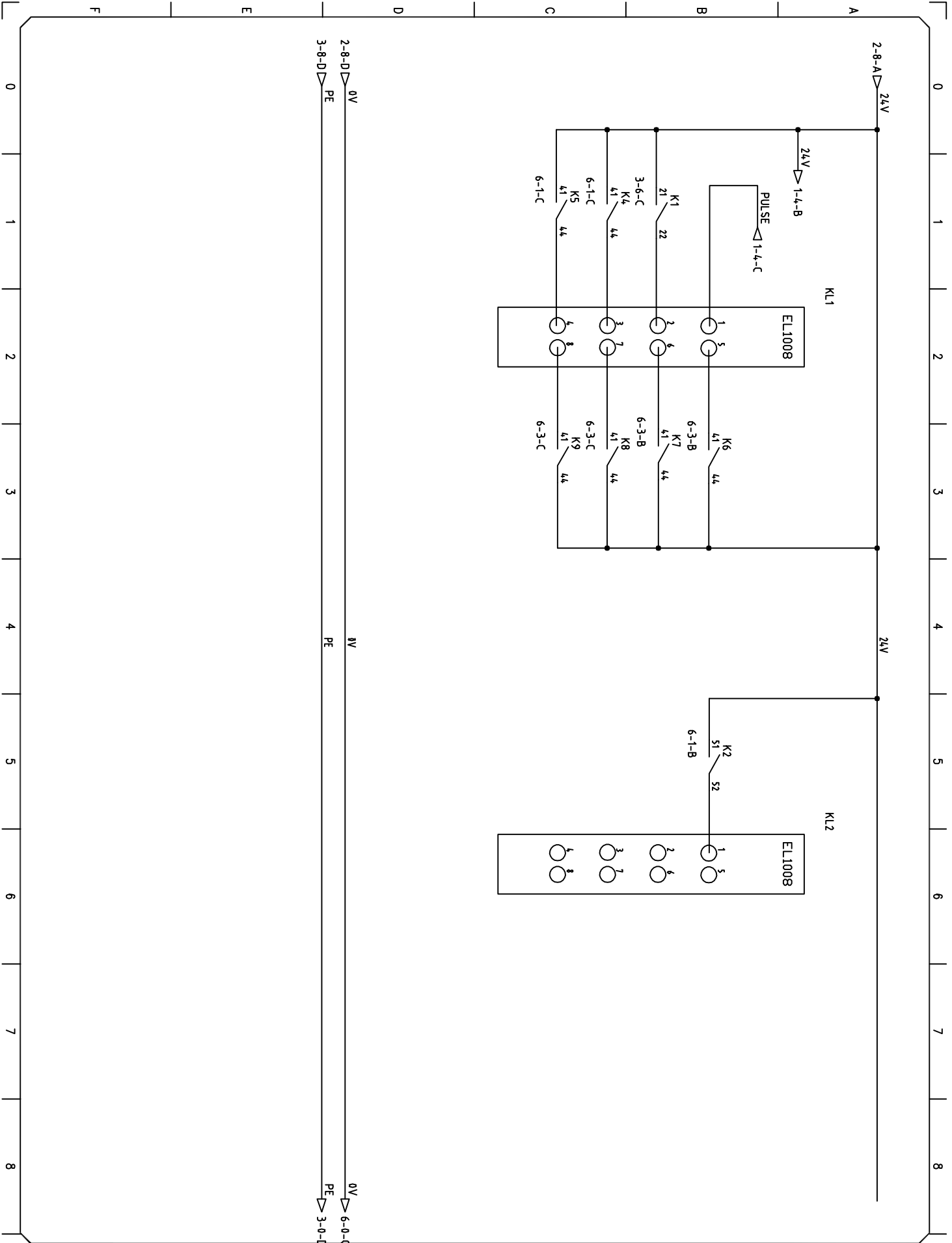


Autodesk

NO.	DATE	REVISION	BY

DESIGNED BY	CHECKED BY
DRAWN BY	REVIEWED BY
DATE	DATE
SCALE	SCALE
NO. OF SHEETS	TOTAL NO. OF SHEETS
PROJECT NO.	PROJECT NAME



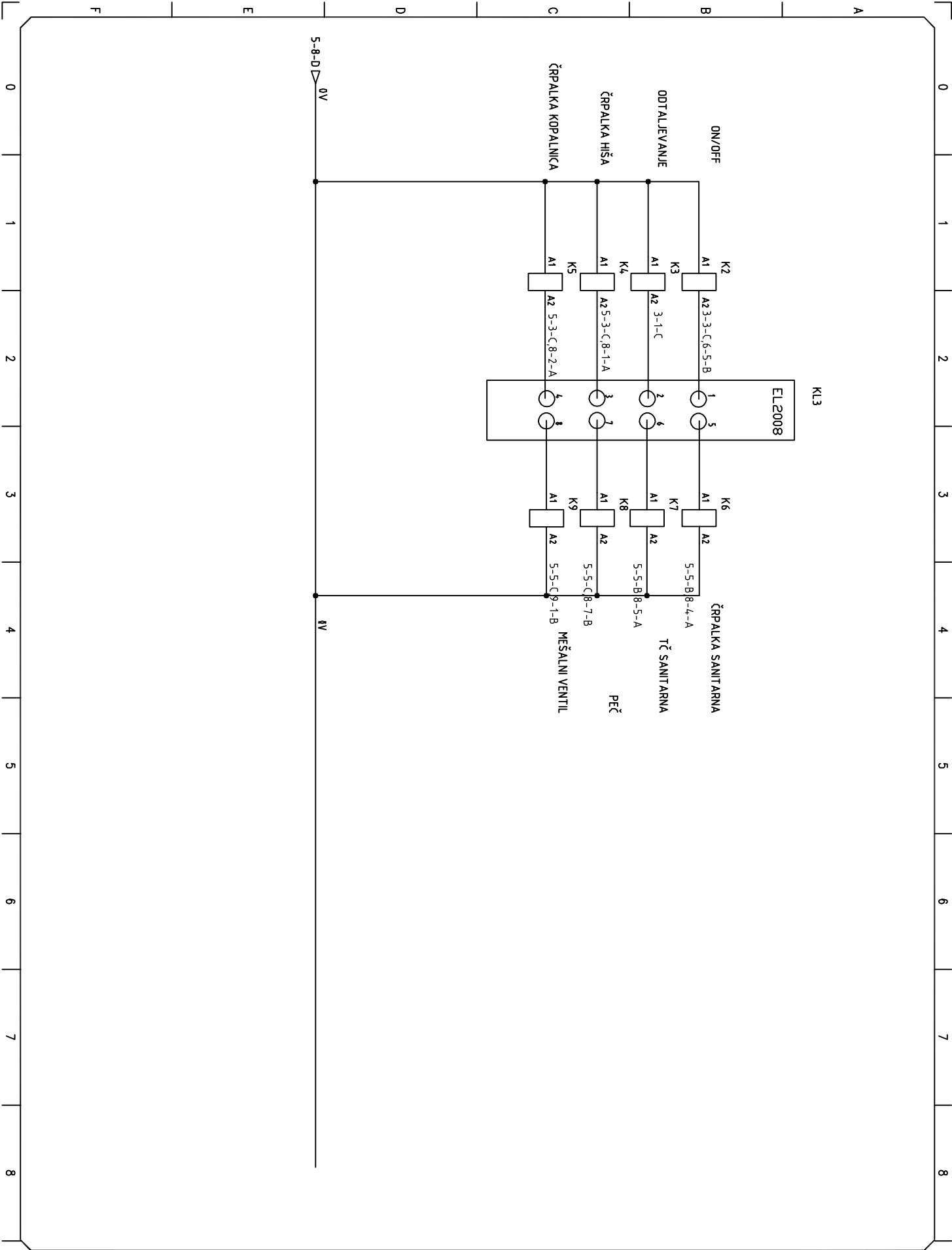


Autodesk

NO.	DATE	REVISION	BY

DESIGNER	CHECKED BY
DATE	DATE
SCALE	SCALE
UNIT	UNIT
PROJECT NO.	PROJECT NO.

6 OF 10

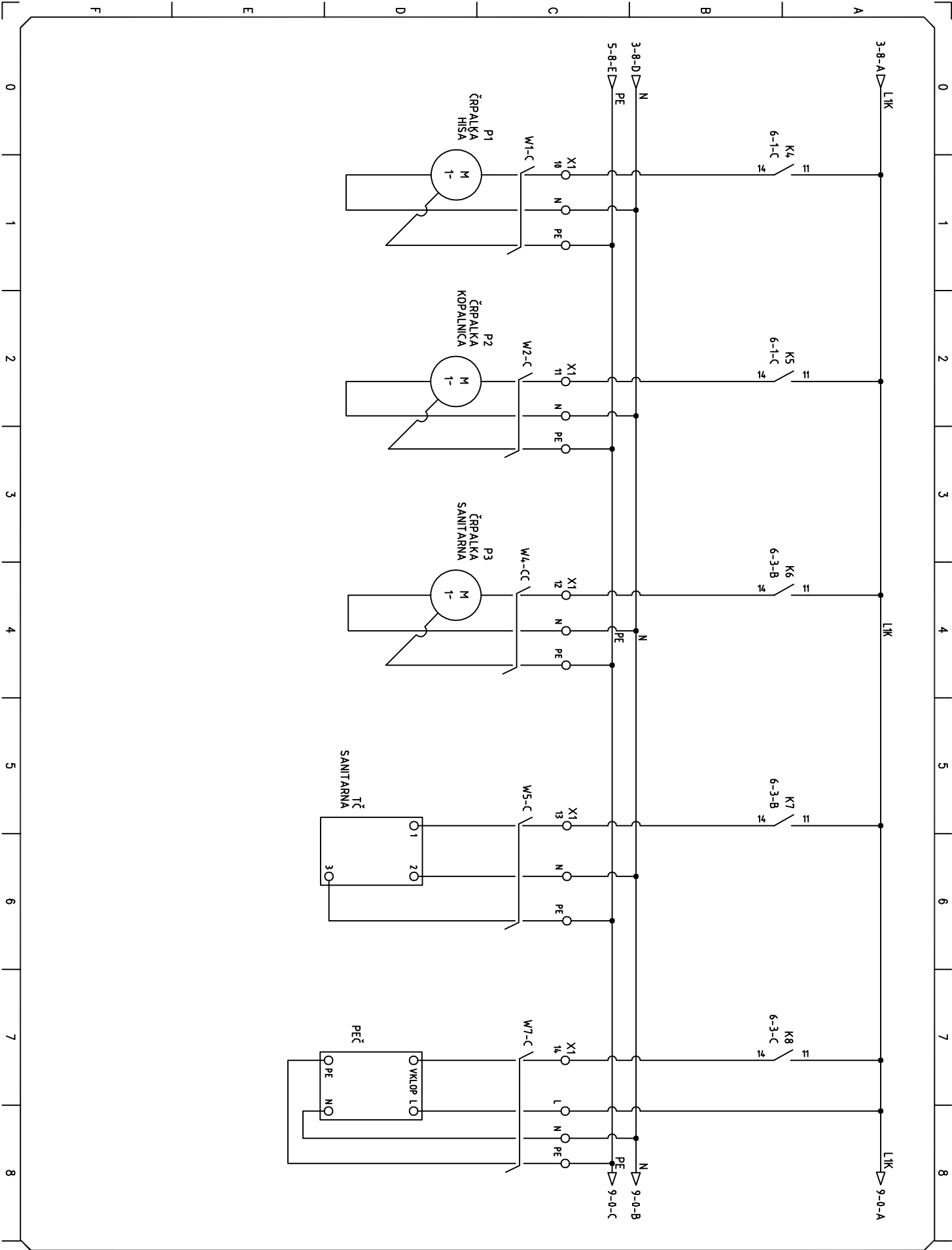


Autodesk

NO.	DATE	REVISION	BY

DESIGNER	CHECKED BY
DATE	DATE

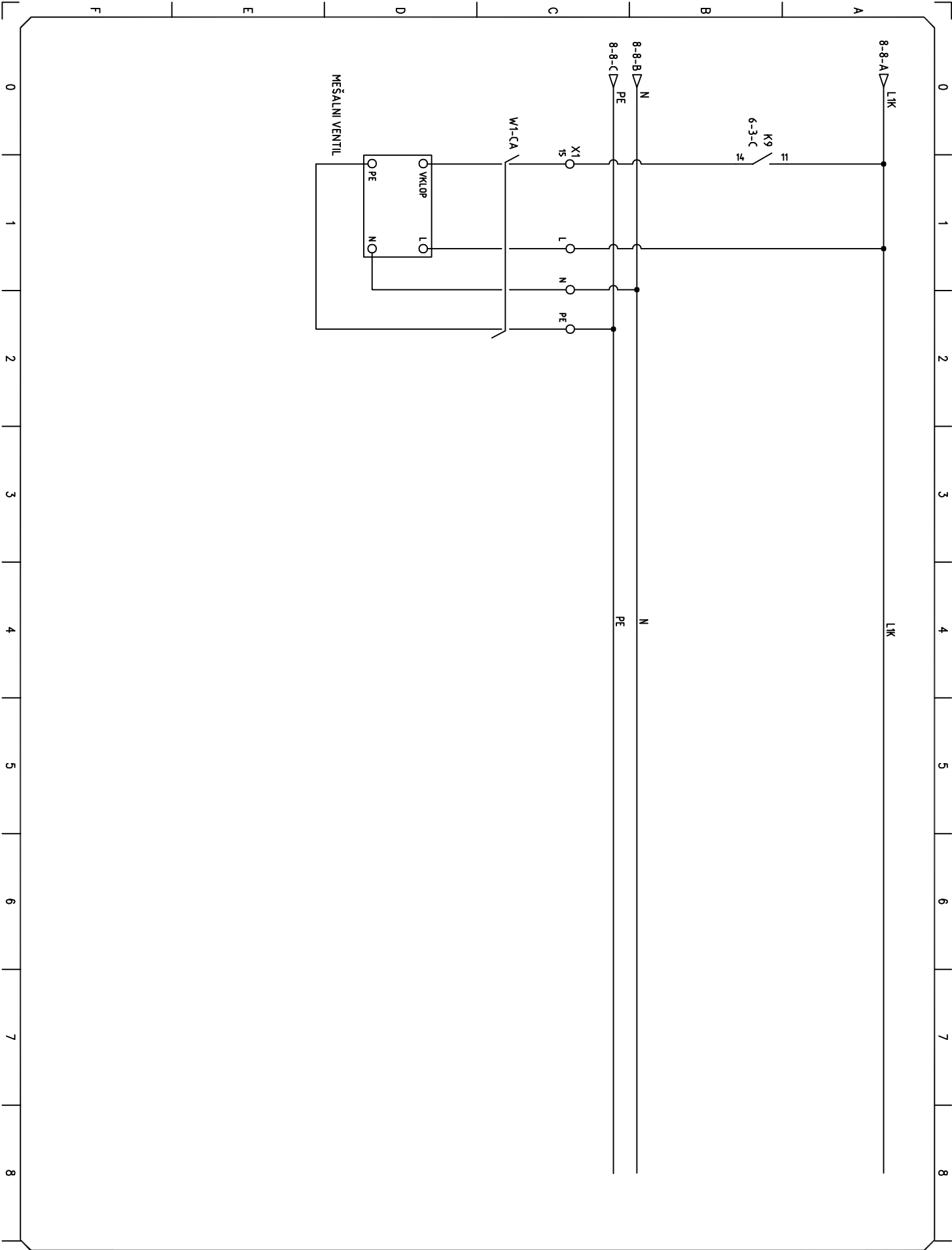
7 OF 10



Autodesk

NO.	DATE	REVISION	BY

DESIGNED BY	CHECKED BY
DRAWN BY	REVIEWED BY
DATE	DATE
SCALE	SCALE
PROJECT NO.	PROJECT NO.
SHEET NO.	SHEET NO.
TOTAL SHEETS	TOTAL SHEETS



Autodesk

NO.	DATE	REVISION	BY

DESIGNER	CHECKED BY
DATE	DATE

10 OF 10